運動単位の発火頻度の集合筋電位パワースペクトラムへの影響

吉田正樹（大阪電気通信大学）、赤澤堅造（神戸大学）

1．はじめに　誘導面積の大きな電極で誘導される筋電位（集合筋電位）は、筋の活動状態をよく反映し測定が容易であるので、動作解析など多くの目的に用いられている．筋電位の周波数解析は、筋の運動機能に関する情報を得るための重要な手段である．しかし、実測した MU の発火頻度との関連を検討した研究は見当らない．本研究は、実測結果とモデルを用いた解析により、集合筋電位のパワースペクトラムと MU の発火頻度との関連を明確にすることを目的とする．

2．実験による解析　上腕筋と総指伸筋の等尺性収縮時の集合筋電位を計測し、パワースペクトラムをを求めた。総指伸筋の等尺性収縮時に得られた集合筋電位のパワースペクトラムの例を第１図に示す．第２図に上腕筋の集合筋電位のパワースペクトラムより得られた低周波極大周波数 fs を×印で示す．また実線は、同一被験者の 35 個の MU の発火頻度を釣り針型電極を用いて直接測定した結果である．これらの結果より、低周波極大周波数 fs は MU の発火頻度を反映していると考えられる．

3．モデルによる解析

3．1 集合筋電位発生モデル　測定した fs と張力との関係を定量的に解析するために、MU の活動様式に基づいた集合筋電位発生モデルを用いる．本モデルで用いた仮定は、以下のとおりである．

(1) 観測される集合筋電位は、活動中の MU の活動電位(MUAP)の線形和である．

(2) MUAP の波形は、振幅を除いて、すべての MU に対し同じである．

(3) すべての MU は、互いに独立に発火する．

(4) １つの MU において、MUAP の発生間隔は、互いに独立で、正規分布をする．

以上の仮定に基づくと集合筋電位$X_j(t)$のパワースペクトラム$Px_j(\omega)$は、途中経過を省略して結果だけを表すと次式で示される。

$$Px_j(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} X_j(\tau)\exp(-i\omega\tau)d\tau \right|^2 = H(\omega)\cdot M(\omega)$$

$$H(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)\exp(-i\omega\tau)d\tau \right|^2$$

$$M(\omega) = \sum_{l=1}^{j} N_l K_l^2 \left| \int_{-\infty}^{\infty} U^m{}_{l,j}(\tau)\exp(-i\omega\tau)d\tau \right|^2$$

ただし、j は張力レベルを表し、$U(\tau)$は、神経インパルス列である。

ここで、$M(\omega)$は MU の活動を反映する項で張力に依存して変化し、$H(\omega)$は正規化した MUAP 波形に関係し、張力に依存しない項である．

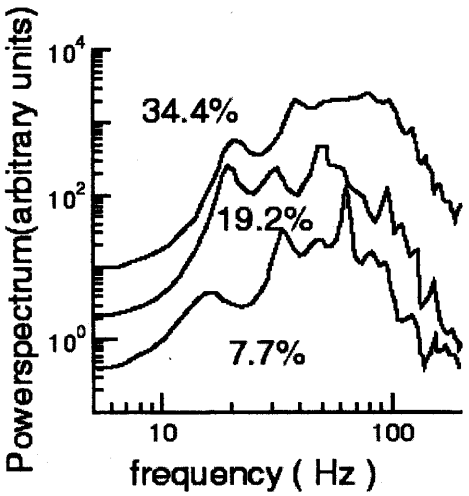
3．2　シミュレーション結果　集合筋電位のパワースペクトラムをシミュレートするためには、活動中の運動単位の数とその大きさ、発火頻度の変化、および神経インパルスから集合筋電位への伝達特性 $h(\tau)$が必要である．活動中の運動単位の数とその大きさは、筋電位より推定した結果を、発火頻度の変化は釣針型電極により実測した結果を用いた。$h(\tau)$は、平均応答法で測定した．その結果を第３図Ａに、そのパワースペクトラム$H(\omega)$を第３図Ｂに示す．また、$M(\omega)$を第４図Ａに示す．$M(\omega)$は、10～20Hz の間で MU の発火頻度の平均に対応する周波数でピークを示す（図中の矢印）．第３図Ｂの$H(\omega)$と第４図Ａの$M(\omega)$より、集合筋電位のパワースペクトラム$H(\omega)\cdot M(\omega)$を求めた結果を第４図Ｂに示す．低周波極大周波数 fs は、張力と共に高くなっている．これは、MU の発火頻度の平均が張力と共に高くなることに対応している．このシミュレーションにおける低周波極大周波数 fs と張力の関係を第２図の実線で示す．実測値と良く一致しているといえる．

4．おわりに　本研究の結果を以下に示す．

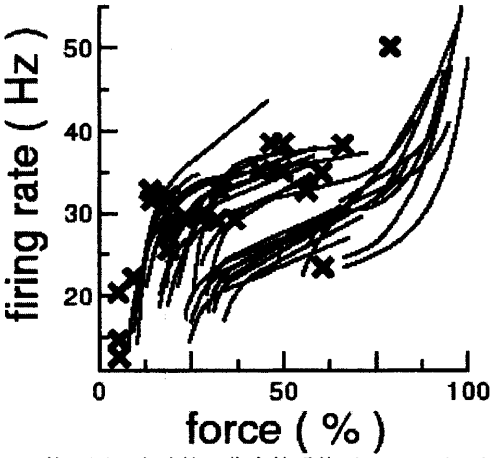
1）ヒトの総指伸筋と上腕筋の等尺性収縮における集合筋電位を種々の張力で測定した．また、釣り針型電極を用いて測定した MU の活動電位の波形を同定して、MU の発火頻度を実測した．

2）集合筋電位のパワースペクトラムの低周波領域における極大周波数 fs は張力と共に高くなり、実測した MU の発火頻度の平均に対応した．

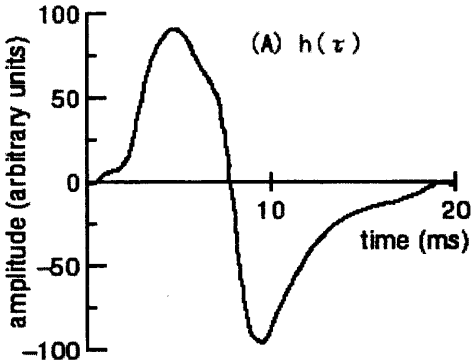
3）モデルによる解析により、集合筋電位のパワースペクトラムの低周波領域における極大周波数は、MU の発火頻度の平均に対応することを示した．

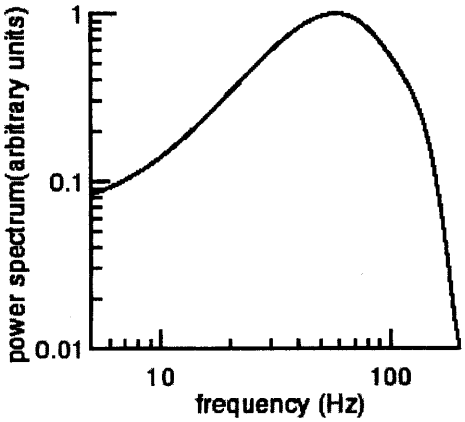


第１図　総指伸筋の集合筋電位パワースペクトラム

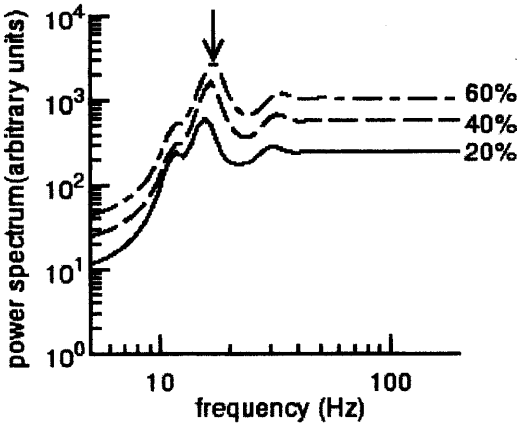


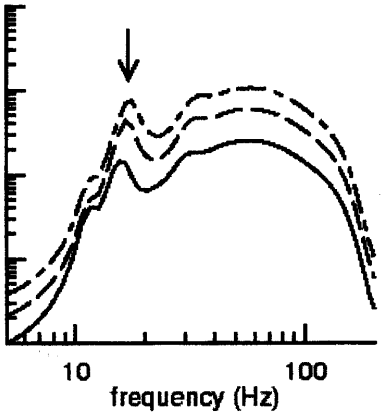
第２図　上腕筋の集合筋電位パワースペクトラムの低周波極大周波数（×印）と運動単位の発火頻度の実測値（実線）





第３図　総指伸筋の運動単位の活動電位（A）とそのパワースペクトラム（B）





第４図　集合筋電位のパワースペクトラムにおいて運動単位の活動に依存する項（A）とシミュレーション結果（B）