

．はじめに

筋肉の収縮を調べる実験は、カエルのひ腹筋を用いて、インダクトリウムやキモグラフなどの機器を使用して行われている。しかし、カエルの入手や機器の使用の困難さのため、授業でこの実験を実施することが難しいとされている。

これに対して、最近、広島立教育センター 指導主事 川本 中 氏が、カエルに代えてヒトの筋肉を素材とした実験方法を開発された。今回、この開発教材に工夫を加え、ヒトの筋肉の単収縮、不完全強縮、完全強縮が測定できたので、これについて報告する。

．ヒトの筋肉収縮の実験について

最初に、川本氏の開発されたヒトの筋肉の収縮を素材とした実験を紹介する。1)

筋肉としては、手の浅指屈筋を使う。電気刺激は、本来は筋肉のこりを和らげるための「低周波治療器」(オムロン社製 エレパルスHV-F04)を用いて与える。

実験方法は次の通りである。「低周波治療器」の電極の一方を肘に、もう一方を前腕の内側の中程で少し腕の関節に近い部分に付着させ、腕に電気刺激を与える。そうすると、手の筋肉の浅指屈筋が収縮し、その収縮が指の動きに表れてくる。そして、指の動きをパソコンで計測し、筋肉の収縮の様子を調べるといふものである。

なんらかの自然界の量をパソコンで計測を行う場合、図1のようなシステムが必要である。計測量を電圧に変換するためのセンサー、ADコンバータが必要である。

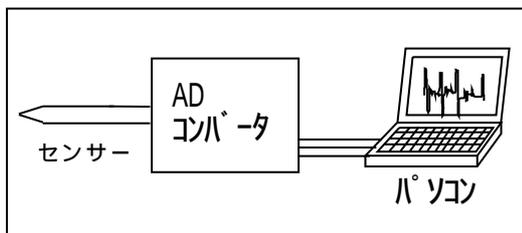


図1 パソコンを用いた計測システム

川本氏は、指の動きをパソコンで計測するために、センサーとして、ニクロム線を使用し、図2のような計測方法を考案された。1 m程度のニクロム線の一方を指につなぎ、もう一方を下に垂らして、50 g程度の重りをつなぐ。そして、端子B、C間には、9 V程度の電圧を加え、端子A、B間の電圧をADコンバータに入力しておく。手に電気刺激を与え、筋肉が収縮すると、指が図の右に動き、ニクロム線が右に動き、その動きに比例して、端子A、B間の電圧が変化する。こうして、電圧変化をパソコンで計測することで、電気刺激に対する、筋肉の収縮が測定される。

パソコンを使うこの方法は、何度も簡単に実験が繰り返すことができ、2チャンネル入力のADコンバータを使えば、刺激と収縮の関係がその場で観察できる。

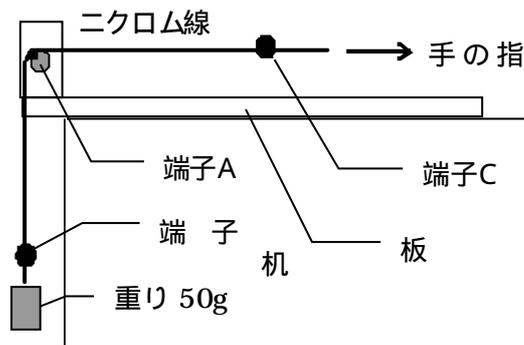


図2 ニクロム線を用いた筋肉収縮の実験

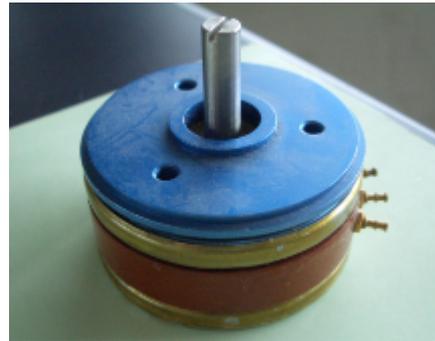


写真1 ポテンシオメータ

・ポテンシオメータを用いた筋肉の収縮の開発教材

今回、私は、指の動きを測定するセンサーのニクロム線の変わりに、写真1に示すポテンシオメータを用いて実験を行った。ポテンシオメータとは、中心の軸が回転することで抵抗値が変化する可変抵抗器のことである。ポテンシオメータを用いても、原理的には、川本氏の考案された実験方法と全く同一である。ポテンシオメータを使用することで、ノイズがかなり小さくなり、細かい動きまでの測定が可能になった。欠点としては、このポテンシオメータがなかなか入手できないことである。

A/Dコンバータは、4チャンネルの入力が可能であるMB4052(富士通)を使用し自作した。計測ソフトウェアは、2チャンネル入力に対応し、実験のその場で刺激と筋肉の収縮の関係が分かるように自作した。また、このソフトウェアは、計測データをテキスト形式で保存でき、市販の表計算ソフトでデータ処理ができるようにした。今回は、データの処理には、EXCEL(Ver5)を使用した。

・筋肉の収縮の計測結果

(1) 電気刺激

図3に、筋肉に与える電気刺激の測定結果を示す。縦軸は筋肉に与える電圧の相対的値を示し、横軸は時間を示す。縦軸の振幅が一定でないのは、A/Dコンバータのサンプリング時間が1ms程度のためである。縦軸の電圧の振幅は数10V程度である。図3での与えた電気刺激の時間間隔は150ms程度である。今回使用した「低周波治療器」は、この時間間隔を手動で調整できるようになっている。この時間間隔を調整して、単収縮、不完全強縮、完全強縮を起こすことができる。

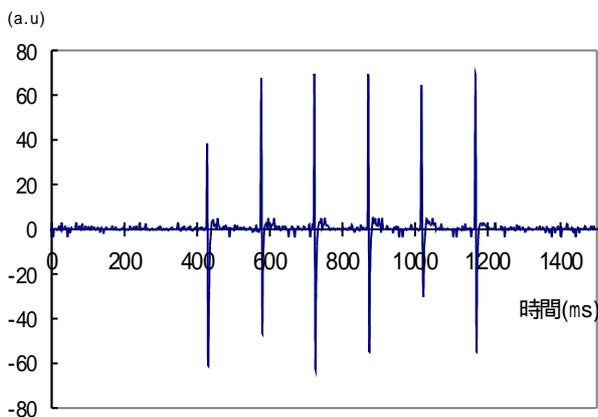


図3 電気刺激のグラフ

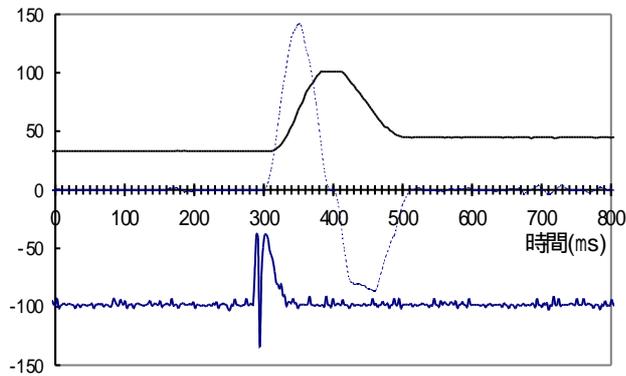
(2) 筋肉の収縮の測定結果及び考察

ア 筋肉の収縮の測定結果

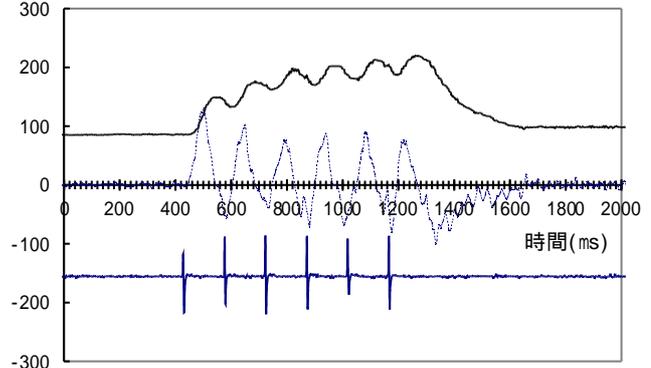
図4の(a)~(e)に、電気刺激の時間間隔をそれぞれ1500ms, 146ms, 94ms, 64ms, 18msと変化させた場合の筋肉の収縮の測定結果を示す。

図4は、指の位置、指の速度、電気刺激と時間の関係を示している。縦軸は相対値を示す。

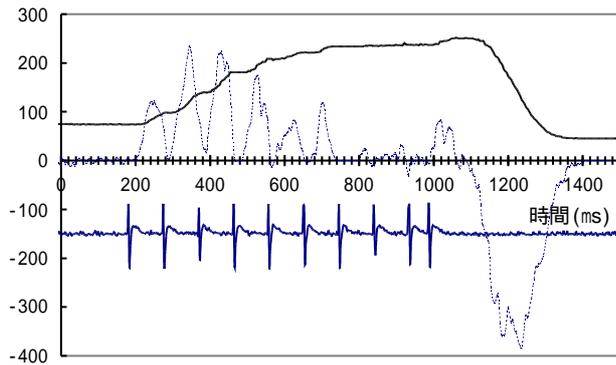
a)



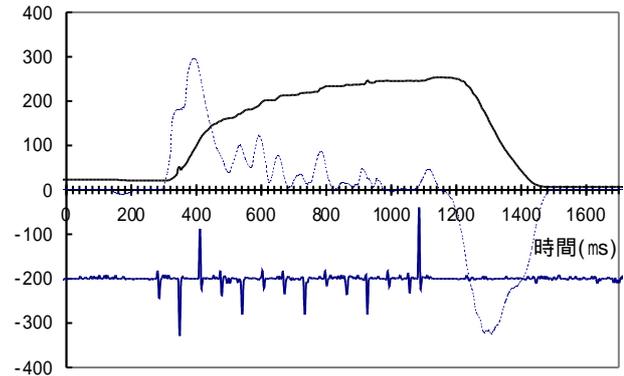
b)



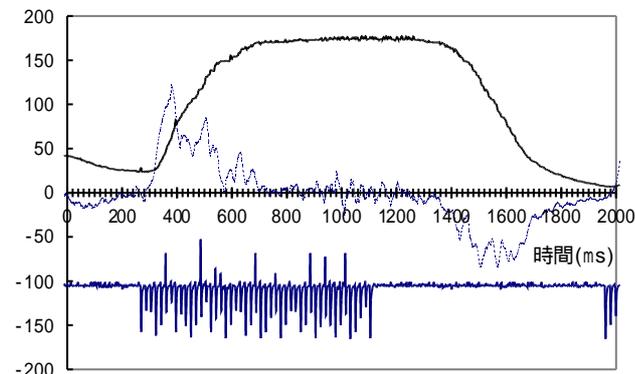
c)



d)



e)



グラフ上の太い実線は指の位置、点線は指の速度、グラフ下の青い細い実線は電気刺激を示す。電気刺激の時間間隔が、(a)1500ms, (b)146ms, (c)94ms, (d)64ms, (e)18msである。)

図4 筋肉の収縮の測定結果

指の位置の縦軸の値は、筋肉の収縮に比例した変化を示している。ある時刻での筋肉の収縮量の相対値は、時刻0msでの縦軸の値との差で求められる。

指の速度の縦軸の値は、次のことを意味する。0では静止状態を表す。正の値では筋肉が収縮してい

る状態，負の値では筋肉が弛緩している状態を表す。また，絶対値がその時の指の速さを表す。
電気刺激の値は，グラフを見やすくするために，負の方向（下方向）にずらしている。

イ 考察

新学習指導要領では，探究活動を通して，探究の方法を習得させることが求められている。

この実験を授業で行った場合，次の(ア)～(ウ)の考察を行うことで次のような探究の方法が身につくと考える。(ア)(イ)では数的に処理する力，データを分析・処理する力，(ウ)では仮説やモデルを設定する力が養われると思われる。

(ア) 浅指屈筋の潜伏期，収縮期，弛緩期の考察

図4(a)は単収縮を示している。その単収縮の測定結果より，手の浅指屈筋の潜伏期，収縮期，弛緩期を図5に示す。ただし，ここでいう潜伏期とは，低周波治療器による電気刺激を皮膚に与えてから浅指屈筋が収縮を始めるまでの時間である。指の位置の結果より，潜伏期は20ms，収縮期は90ms，弛緩期は100msであることがわかる。なお，指の速度は，指の位置のデータの10ms間を平滑化微分することで求めているため，指の速度から潜伏期，収縮期，弛緩期を求めると ± 5 ms程度の誤差が生じる。

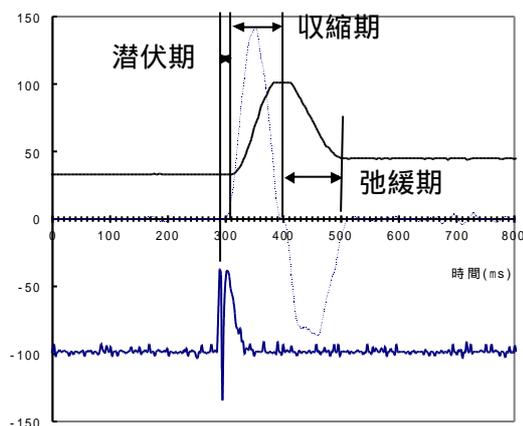


図5 単収縮の測定結果

(イ) 電気刺激の周波数と不完全強縮及び完全強縮の関係についての考察

電気刺激の時間間隔の逆数を取ると電気刺激の周波数となるが，図4(b)～(e)では，それぞれ6.8Hz，11Hz，16Hz，56Hzに対応する。

指の位置の結果から見ると図4(b)は不完全強縮，図4(e)は完全強縮とわかるが，図4(c)，(d)の2つはどちらかというのはかなり難しい。

しかし，図4(e)(d)ともに，指の速度の変化から見ると1つ1つの電気刺激に反応しているため，不完全強縮といえる。

6～20Hzの電気刺激に対しては不完全強縮，60Hz以上の電気刺激に対しては，完全強縮が起こることがわかる。

(ウ) 不完全強縮の筋肉収縮のモデル化

不完全強縮について，高校レベルでは，いき値の考え方を使った次のようなモデルを作り，指の位置の変化，指の速度の変化の考察ができると思う。

筋肉はいき値を異にする筋肉繊維の集まりである。まず，図6のように，1～14番の筋肉繊維を考

える。縦軸は、それぞれの筋肉繊維の収縮の強さとする。番号が大きいほど強い刺激に対して反応する筋肉繊維である。図 4 (b)の指の位置の変化の測定結果より、収縮の強さは番号の平方根に比例すると考える。(指の位置の変化の山の部分が、それぞれの筋肉繊維の反応の強さの最大値と考えた。)

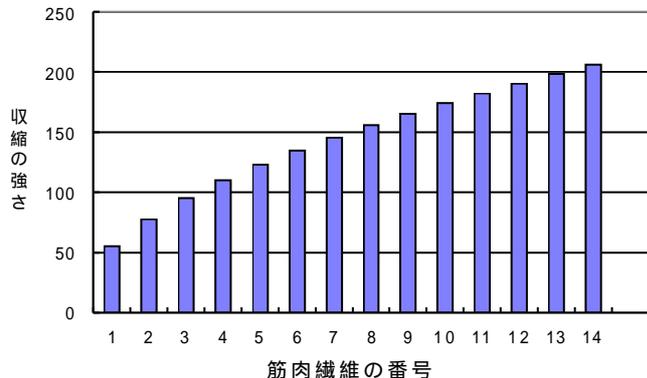


図 6 各筋肉繊維の収縮の強さ

それぞれの筋肉繊維が収縮するとき次の a), b)の 2 つの法則に従うと仮定する。

a) すべての筋肉繊維の潜伏期は 20ms, 収縮期, 弛緩期は 95ms とする。そして, 収縮期, 弛緩期は sin の 2 乗関数で近似する。(図 7 参照)

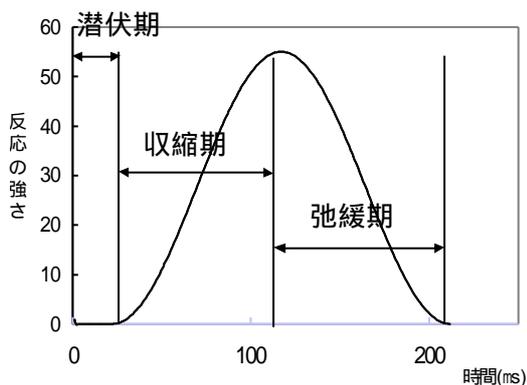


図 7 各筋肉繊維の潜伏期, 収縮期, 弛緩期

b) n 番目の筋肉繊維の収縮が終わらないうちに, 次の刺激が与えられると, $(n + 1)$ 番目の筋肉の収縮が始まる。その時, $(n + 1)$ 番目の筋肉繊維の潜伏期の間は, n 番目の筋肉の収縮・弛緩が起こるとする。そして, その後, 潜伏期の終わった直後の反応の強さから, $(n + 1)$ 番目の筋肉の収縮が起こる。それぞれの筋肉繊維の収縮の強さは図 6 の最大値を超えない。(図 8 参照)

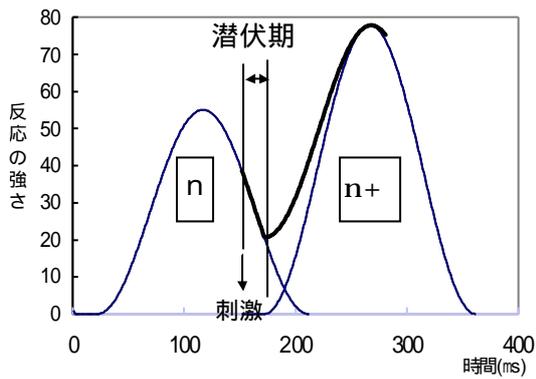
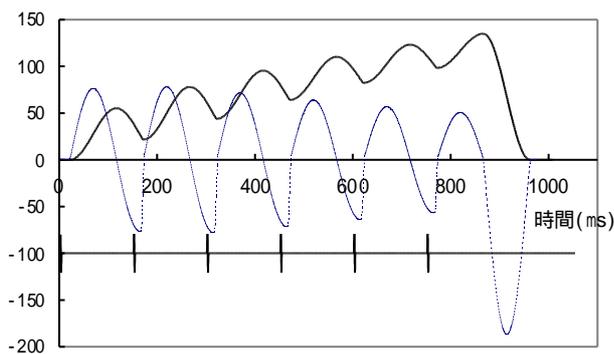


図8 n, n + 1 番目の筋肉繊維の収縮の関係
(太線が実際に起こる反応の強さを示す。)

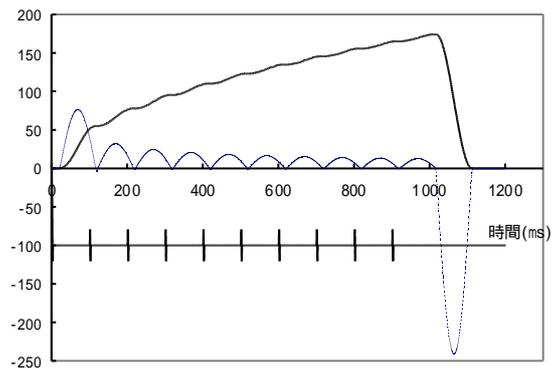
以上の法則に従うモデルを数値計算で確かめた結果が図9である。

図9 (a), (b), (c)はそれぞれ刺激の間隔が, 150ms, 100ms, 60ms である。位置の変化, 速度ともそれぞれ図4 (b), (c), (d)の実験結果とよく一致した。

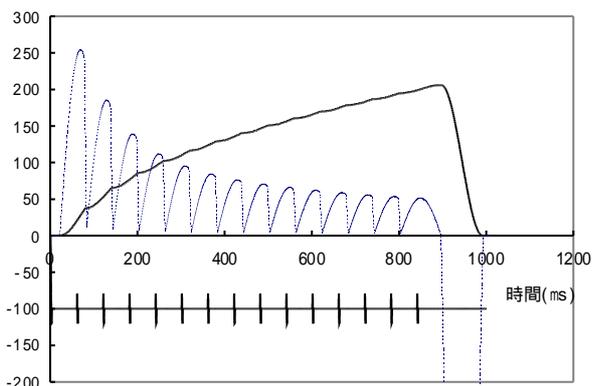
a)



b)



c)



グラフ上の太い実線は指の位置, 点線は指の速度, グラフ下の細い実線は電気刺激を示す。電気刺激の時間間隔が, (a)150ms ,(b)100ms ,(c)60ms である。)

図9 不完全強縮を起こす刺激を与えた場合のモデル計算による指の位置, 指の速度変化の計算結果

参考文献

- 1) 川本 中. 1994. 低周波治療器を用いた筋肉の実験 - ヒトの浅指屈筋の収縮を素材として - 全国理科教育センター研究協議会