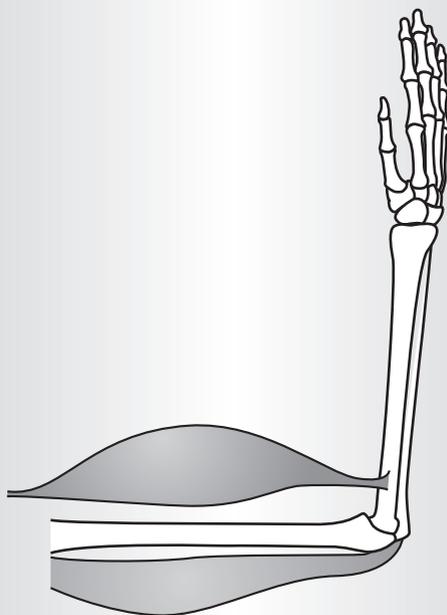


第 1 章

人間の筋肉の仕組み



筋肉の種類

アクチュエータはメカトロニクスにおいて人間の筋肉に相当する機能である。現在まで様々なアクチュエータが提案されているが、人間をはじめとした生物の筋肉のように軽量・高出力で持続性の高いアクチュエータは開発されていない。この意味で生物の筋肉は、アクチュエータ開発におけるお手本といえる。本章では、そのお手本である人間の筋肉の構造と駆動メカニズムについてミクロおよびマクロ的な視点から解説していく。

人間の筋肉は、人間の体重全体の約40%を占めているといわれている。この筋肉は主に**横紋筋**、**心筋**、**平滑筋**に分別することができる。

横紋筋は、一般的にいわれている「筋肉」の代名詞であり、**骨格筋**とも呼ばれている。例えば、腕部の上腕二等筋などのように骨格や腱に付着し、自分の意志で動かすことのできる筋肉である。

また、**心筋**は心臓の筋肉である。心臓部は血液を循環させるためのポンプの役割を担っていることから、人間の筋肉の中でも大きい出力をもった筋肉である。横紋筋の一種であるが、定期的に挙動し自分の意志で動かすことができない。

さらに、**平滑筋**は内臓を形作る筋肉である。例えば、食道や腸などは**蠕動運動**という運動によって食塊を運搬している。この運動は、環状筋と縦走筋いう2種類の平滑筋によって収縮・伸張を繰り返すことによって発生することができる。

この3種類の筋肉の中で、前述の横紋筋は自分の意志で動かすことができるが、心筋と平滑筋は自律神経に支配されているため自分の意志で動かすことはできない。したがって、今後の筋肉の説明は横紋筋について説明していく。

筋肉の構造

それでは、筋肉がどのような要素で構成されているか考えてみよう。

図1.1に筋肉の構造を示す¹⁾。この図のように筋肉は多数の**筋束**の間に動脈と静脈が張りめぐらされた構造となっている。それぞれの血管は筋束の中に入り込み、収縮に必要な栄養や酸素のやり取りを行っている。この筋束は多数の**筋繊維**で構成されており、さらに筋繊維は多数の**筋原繊維**から成り立っている。つまり筋肉は、この筋原繊維の集合体であることがわかる。

なお、筋原繊維はナノオーダー単位の非常に細い繊維である。この繊維は細胞の集まりであり、この繊維が伸縮することで全体の筋肉が駆動する。

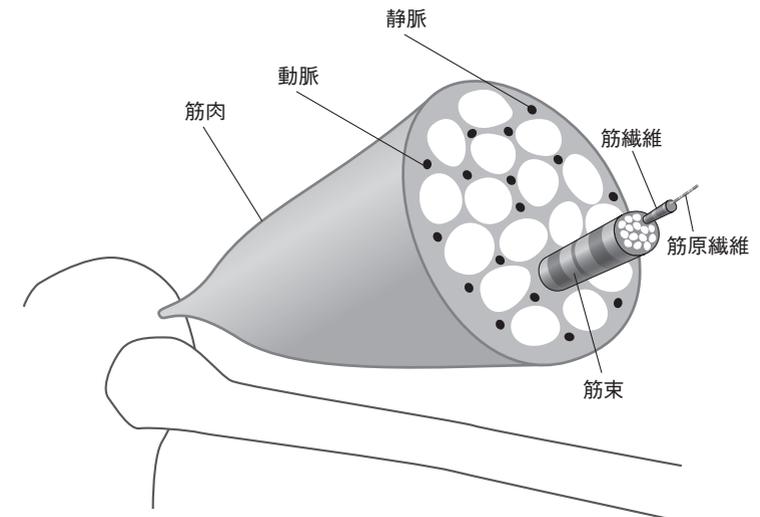


図 1.1 筋肉の構成要素

人間の筋肉はなぜ動くのか？

(1) 筋肉は収縮ししかない

油圧や空気圧のシリンダなどをはじめとした一般的な直動アクチュエータは収縮と伸張を行うことができるが、人間の筋肉は収縮のみしかを出力することができない。したがって、腕などの屈曲や伸展は、**図 1.2** に示すように1つの関節を挟んで2つの筋肉を拮抗させることによって運動している。この拮抗配置により、人間の腕の関節は角度と剛性を変化させることができる。

(2) 筋原繊維の構造

それでは、人間の筋肉はどのように収縮するのかについて詳しく説明していく。

前述の筋原繊維を拡大したものを**図 1.3** に示す。この図より、筋原繊維はミオシンフィラメントとアクチンフィラメントとZ膜からなっている¹⁾。アクチンフィラメントはZ膜によって束ねられており、アクチンフィラメントの間にミオシンフィラメントが挟まれるようにして配置されている。この長さは約 $2\sim 3\mu\text{m}$ と非常に小さい。さらに、Z膜を介してこの配置が直列につながった構造となっている。

(3) 筋原繊維の収縮メカニズム

図 1.4 に筋原繊維を拡大した図を示す。ミオシンフィラメントとアクチンフィラメントはミオシン分子頭部モータドメインという分子モータによってつながっている。筋原繊維の収縮は、このアクチンフィラメントの間にミオシンフィラメントが入り込むことによって収縮する。

では、どのようにしてミオシンフィラメントは入り込んでいくのだろうか？

図 1.5 は、さらにこの構造を拡大した図である。この図より、ミオシン分子頭部モータドメイン（以下：ミオシン分子モータ）は、ミオシン側に回転中心をもつアームのような機能を 50nm ごとに配置していることが分かる。ここ

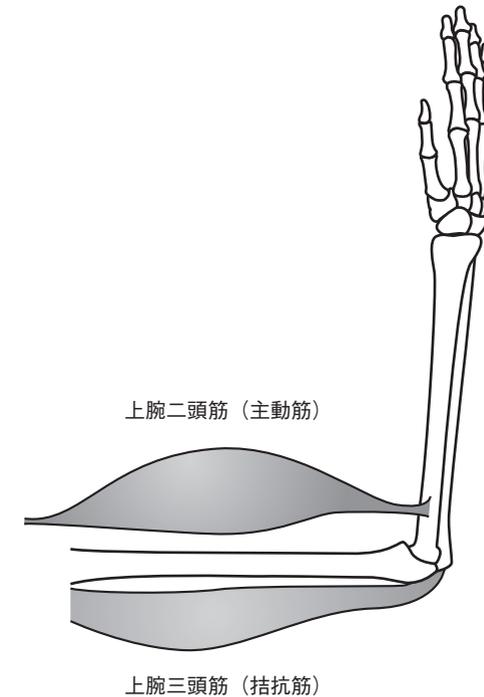


図 1.2 筋肉の拮抗配置

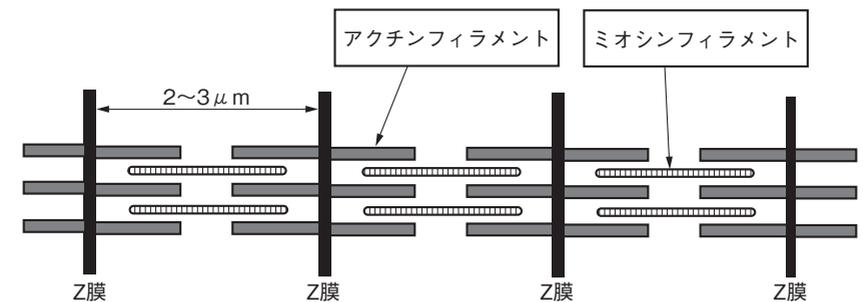


図 1.3 筋原繊維の構成要素

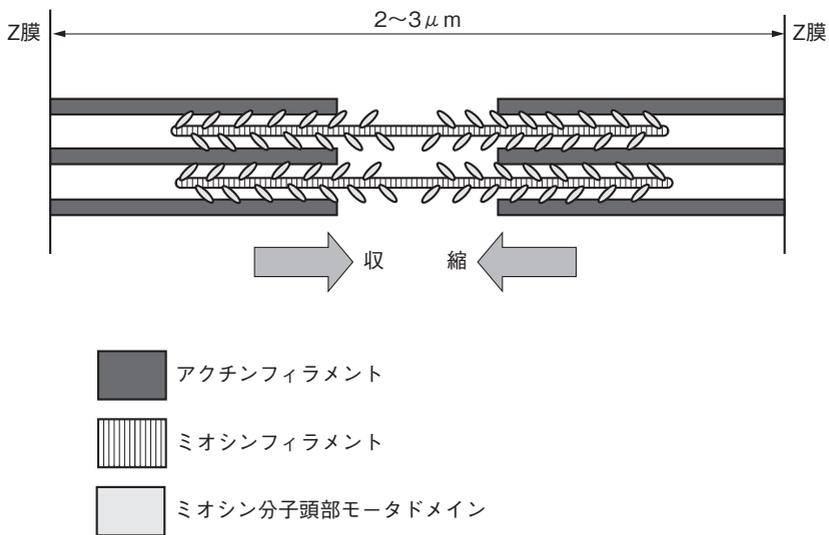


図 1.4 筋原繊維の構造

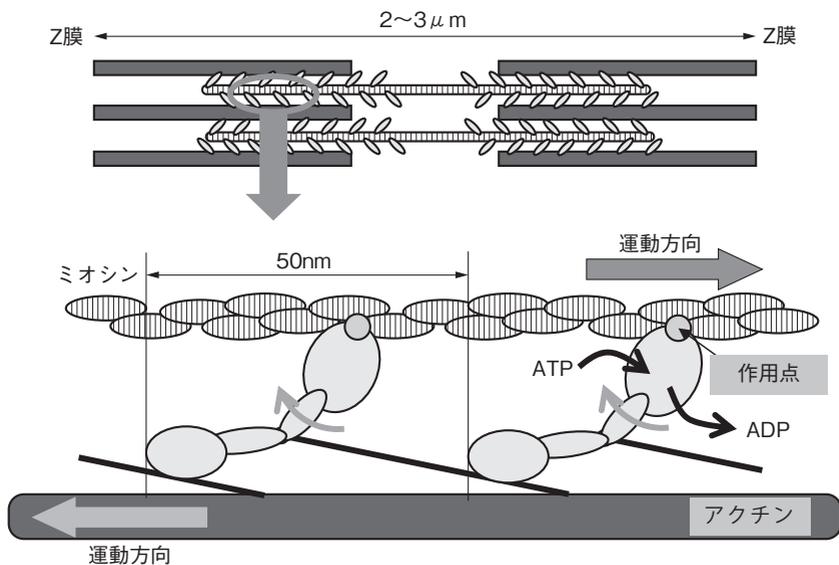


図 1.5 筋原繊維の動作原理