

# 肌纖維收縮模型之研究

高中組生物科第三名

台灣省立花蓮高中

作 者：彭弼聲、易志偉

黃國修、林希偉

指導教師：林 國 豐

## 一、研究動機

於高一基礎生物第三章生命的維持，內容談到骨骼肌的構造，骨骼肌是一種橫紋肌，有明帶和暗帶的橫紋，而且兩Z線間，有兩種與Z線垂直的肌絲，其中細肌絲為肌動蛋白，粗肌絲為肌凝蛋白，肌肉收縮時，乃Z線與Z線相互靠近，肌纖維乃到整塊肌肉隨之縮短，此即為肌肉收縮。

我們很想了解更詳細的內容，因此請老師講解，並提供資料，經過仔細推敲之後，仍然不能夠有完整清晰的概念，問題關鍵在課本圖型為平面，若能夠有立體簡易的模型，則可能有助於我們對問題的認識，因此我們開始收集並閱讀有關的資料和書籍如大學生物學、普通動物學、組織學等。待肌纖維模型雛形已成後，我們並同時配合電腦來處理動態及靜態肌纖維收縮型態。

## 二、研究目的

我們希望製作肌纖維收縮模型，作為高中生物科教學時之輔助教材，使同學們對肌肉收縮此一單元，能有立體概念，具體的加深印象，並且能夠實際操作此一模型，同時應用在電腦輔助生物科的教與學。

## 三、研究設備

(一)粗藤條，長度 45 公分 直徑 4 公分

(二)細藤條，長度 30 公分，直徑 2 公分

(三)厚三夾板，鋸成六角形並且鑽六孔。

(四)粗橡皮筋。

(五)鑽孔機。

(六)鋸子。

(七)強力黏著劑。

(八)鉛筆及直尺。

(九)電腦。

## 四、研究過程

(一)肌肉依構造及功能不同可分成三種類型：

1.平滑不隨意肌。

2.橫紋隨意肌（骨骼肌）。

3.橫紋不隨意肌（心肌）。

其中骨骼肌附著在骨骼上，平滑肌分布於內臟或消化管部份，心肌分布於心臟，肌肉組織是由特化的肌肉細胞即肌纖維組成，能夠從事機械性的工作，據估計一個人體內約有二億五千萬條肌纖維，而肌纖維內含有許多肌原纖維，肌原纖維（Myofibril）由許多肌絲（Myofilament）規則排列成。

肌絲有兩種：(1)粗肌絲，成分為肌凝蛋白（Myosin），長度為

$1.3 \sim 1.5 \mu$ ，直徑為  $12 \sim 15 m\mu$ 。

(2)細肌絲，成分為肌動蛋白（Actin），長度為  $1 \mu$ ，直徑為  $5 m\mu$ 。

由肌原纖維橫切面觀察，可見一條粗肌絲周圍有六條細肌絲而呈六角形排列。因此模型中初步決定粗肌絲與細肌絲之間——長度比例為  $3 : 2$ ，直徑比例為  $2 : 1$ 。

肌纖維內構造單位以相鄰 Z 線（Z line）為界限，成段存在叫肌節（Sarcomere），所以肌肉可認為是由許多肌節疊合而成。

(二)當我們決定製作肌纖維收縮的模型時，首先遭遇的難題是模型材料的問題，我們考慮過粗細鐵線及焊接用的鐵板，但是太過笨重且又不好處理，於是考慮用木質材料，所以就選用已加工過的粗

細藤條來比喻成粗細肌絲。另外 Z 線在平面圖上為直線，但在立體空間上應考慮為平面，那麼此一 Z 線應思考為六角形之平面做為基本單位，兩 Z 線間構成一個肌節，肌節內含粗、細肌絲，粗肌絲在肌節中心位置，細肌絲附著於 Z 線兩側，而游離端則深入肌節之中央，在電子顯微鏡下可見粗、細肌絲以橫橋 (Cross bridge) 或棘 (Spine) 相連，為連接兩種肌絲之橋樑，此時可知粗肌絲突伸呈六角形之形狀與附近六條細肌絲相連接，因此整個肌纖維之橫橋或棘可用粗橡皮筋連接兩種肌絲，至此模型之藍圖已完成了！

另外，我們也以電腦來處理與肌纖維有關之動態及靜態的模型。

## 五、研究結果

我們一共製作了四組肌纖維的構造模型，而且是四組肌節構造。根據我們觀察及操作此一模型之後，發現它們可以解釋下列現象：

(一) 橫紋肌的橫紋構造，例如明帶 (I 帶)、暗帶 (A 帶)、H 帶及 M 暗帶。(見圖 1)

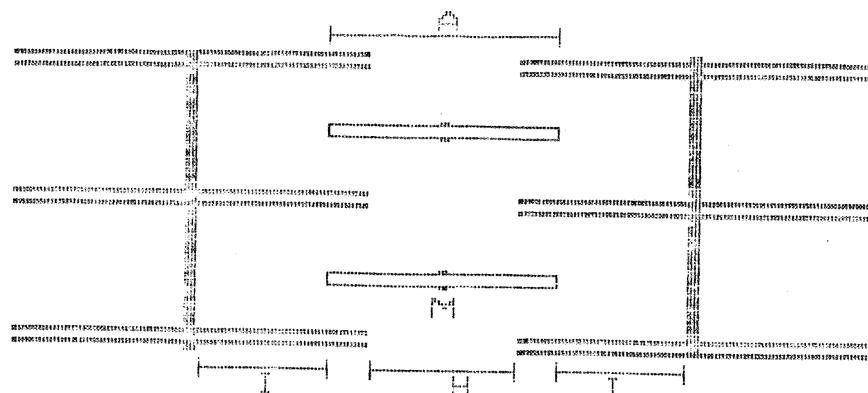


圖 1

(二) 肌節中 I 帶、A 帶、H 帶之橫切面構造。(見圖 2)

(三) 肌肉收縮的機制—滑動絲原理 (Sliding-filament mechanism)。

(四) 可看出一個肌節的平面構造圖。(見圖 1、2、3)

(五) 橫橋及 Z 線的構造問題。

(六) 將有關圖形輸入電腦，表現出肌纖維之動態與靜態。

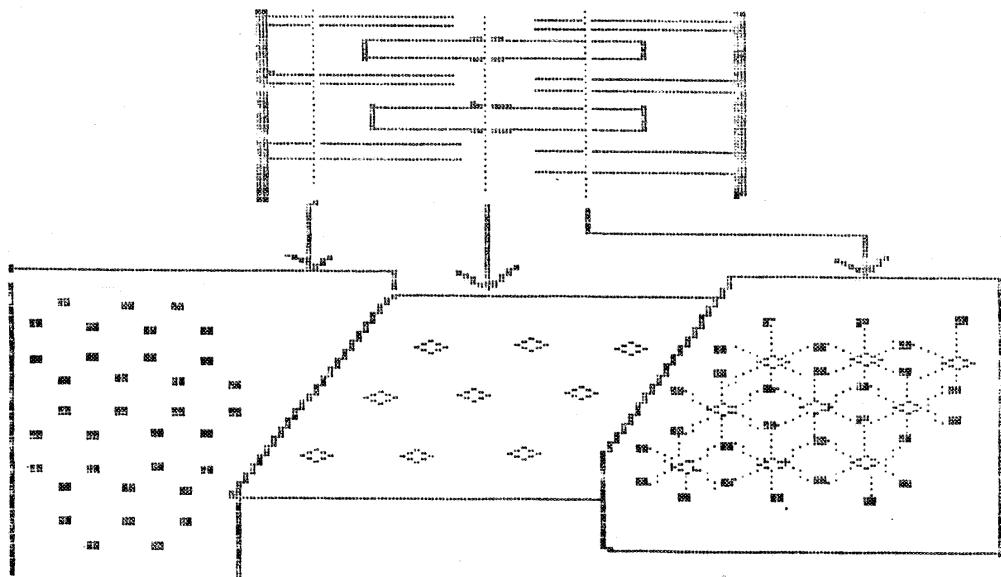


圖 2

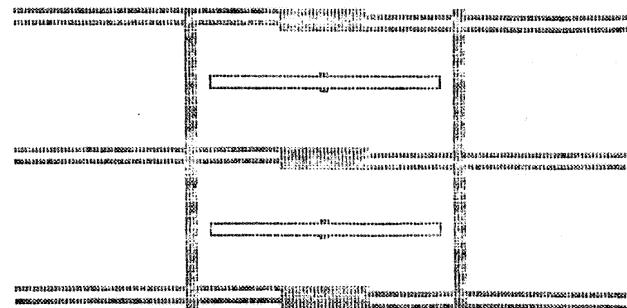


圖 3

### (七) 肌纖維收縮舒張圖示之電腦程式。

```

1000 HOME : HGR : HGR2 : HCOLOR=
3: SCALE=1
1005 HPLOT 108,44 TO 172,44 TO 1
72,48 TO 108,48 TO 108,44: HPLOT
108,93 TO 172,93 TO 172,97 TO
108,97 TO 108,93: HPLOT 139,
43 TO 141,43: HPLOT 139,49 TO
141,49: HPLOT 139,92 TO 141,
92: HPLOT 139,98 TO 141,98
1006 POKE 230,32: HPLOT 108,44 TO
172,44 TO 172,48 TO 108,48 TO
108,44: HPLOT 108,93 TO 172,
93 TO 172,97 TO 108,97 TO 10
8,93: HPLOT 139,43 TO 141,43
: HPLOT 139,49 TO 141,49: HPLOT
139,92 TO 141,92: HPLOT 139,
98 TO 141,98
1010 PRINT CHR$(4); "BLOAD SHAP
E"
1020 POKE 232,0: POKE 233,96
1030 POKE 230,32: ROT=0: DRAW 1
AT 67,20: ROT=32: DRAW 1 AT
213,119
1040 POKE 230,64: ROT=0: DRAW 1
AT 68,20: ROT=32: DRAW 1 AT
212,119

```

```

1041 GOSUB 2000
1042 FOR I = 1 TO 10000: NEXT I
1043 RESTORE
1044 HCOLOR= 0: GOSUB 2000
1045 HCOLOR= 3
1050 FOR I = - 36 TO - 4 STEP
2
1060 POKE 230,32: ROT= 0: XDRAW
1 AT 103 + I,20: DRAW 1 AT 1
05 + I,20: ROT= 32: XDRAW 1 AT
177 - I,119: DRAW 1 AT 175 -
I,119
1070 POKE - 16300,0
1080 POKE 230,64: ROT= 0: XDRAW
1 AT 104 + I,20: DRAW 1 AT 1
06 + I,20: ROT= 32: XDRAW 1 AT
176 - I,119: DRAW 1 AT 174 -
I,119
1090 POKE - 16299,0
1100 NEXT I
1103 POKE 230,32: ROT= 0: XDRAW
1 AT 101,20: DRAW 1 AT 102,2
0: ROT= 32: XDRAW 1 AT 179,1
19: DRAW 1 AT 178,119
1107 POKE 230,64: ROT= 0: XDRAW
1 AT 102,20: DRAW 1 AT 101,2
0: ROT= 32: XDRAW 1 AT 178,1
19: DRAW 1 AT 179,119
1108 GOSUB 2100
1109 FOR I = 1 TO 10000: NEXT I
1110 HCOLOR= 0
1111 GOSUB 2100
1114 HCOLOR= 3
1115 FOR I = - 6 TO - 36 STEP
-2
1120 POKE 230,32: ROT= 0: XDRAW
1 AT 108 + I,20: DRAW 1 AT 1
06 + I,20: ROT= 32: XDRAW 1 AT
172 - I,119: DRAW 1 AT 174 -
I,119
1130 POKE - 16300,0
1140 POKE 230,64: ROT= 0: XDRAW
1 AT 107 + I,20: DRAW 1 AT 1
05 + I,20: ROT= 32: XDRAW 1 AT
173 - I,119: DRAW 1 AT 175 -
I,119
1150 POKE - 16299,0
1160 NEXT I
1165 FOR I = 1 TO 10000: NEXT I:
TEXT
1170 END
2000 HPLOT 72,122 TO 72,128: HPLOT
120,122 TO 120,128: HPLOT 16
0,122 TO 160,128: HPLOT 208,
122 TO 208,128: HPLOT 72,125
TO 208,125
2005 HPLOT 137,107 TO 137,101 TO
140,104 TO 143,101 TO 143,10
7
2010 FOR I = 1 TO 2
2015 READ X,Y
2020 HPLOT X - 1,Y TO X + 1,Y: HPLOT
X,Y TO X,Y + 6: HPLOT X - 1,
Y + 6 TO X + 1,Y + 6
2030 NEXT I
2040 DATA 91,127,188,127
2050 HPLOT 143,127 TO 143,133: HPLOT
147,127 TO 147,133: HPLOT 14
3,130 TO 147,130
2060 GOSUB 2100
2070 RETURN
2100 HPLOT 108,11 TO 108,17: HPLOT
172,11 TO 172,17: HPLOT 108,
14 TO 172,14

```

```
2110 H PLOT 138,12 TO 138,8 TO 14  
    0,6 TO 143,9 TO 143,12: H PLOT  
2120 138,10 TO 143,10  
      RETURN
```

## 六、討 論

(一)橫紋肌是因為粗肌絲與細肌絲排列很整齊，折光性良好，因此有橫紋出現，例如骨骼肌和心肌，後者之橫紋比較不明顯，至於平滑肌則雖也存在著有兩種肌絲，但其排列並不整齊，折光性差，因此並無橫紋出現。

我們以骨骼肌之構造為代表性例子，討論 I 帶、A 帶、H 帶及 M 暗帶之構造如下：

- 1.明帶呈單折光性 ( Isotropic ) 所以又叫 I 帶。
- 2.暗帶呈雙折光性 ( Anisotropic ) 所以又叫 A 帶。
- 3.明帶 ( I 帶 ) 中又有一細小暗 Z 帶。
- 4.暗帶 ( A 帶 ) 中間有一很淡的 H 帶。
5. H 帶中另有一條細的 M 暗帶 ( Middle stripe ) 。

那麼，H 帶意指 A 帶中的中心，無細肌絲的區域，其折光性質較弱，顏色較淺，H 帶的長度取決於收縮的情況。H 帶之中心叫 M 暗帶，此因粗肌絲在 M 暗帶增厚的緣故。

而粗肌絲在肌節中心，相當於 A 帶之位置。至於細肌絲附著於 Z 線兩側，而游離端則延伸入 I 帶，而有一些進入 A 帶。

(二)於肌節中，I 帶、A 帶、H 帶之橫切面構造中。

1. I 帶含細肌絲。
2. A 帶盡頭，同時含粗肌絲及細肌絲。
3. H 帶含粗肌絲。

由模型之結構，很容易了解此項事實。

(三)肌肉收縮之機制：

肌肉收縮時，肌纖維逐漸變短、變寬。目前已證實 A 帶長度固定而 I 帶及 H 帶長度則逐漸縮短，此種收縮是經由一種滑動絲原理而產生，包括兩種肌絲相對位置的變化，而粗肌絲與細肌絲之長度並無改變。當收縮產生時，細肌絲就在粗肌絲上滑過，而被拉

向粗肌絲的中心（M暗帶），結果使得相鄰Z帶間，彼此更加靠近，使得整個肌節變短，同時也使得H帶和I帶寬度變小，終至消失，在完全收縮時，每粗肌絲的終端皆貼近Z線。

這一段說明肌肉收縮的機制，若以模型解釋，不僅一目了然，而且非常容易解釋清楚，不必多費唇舌。

(四)細肌絲長度 $1\text{ }\mu$ ，當肌節長度小於 $2\text{ }\mu$ 時，則細肌絲將在A帶中央相遇，而在橫切面上所見之六角形即將瓦解。若更進一步收縮，將使粗肌絲尾端拉近到Z線來，此時肌節長度與粗肌絲長度均為 $1.5\text{ m }\mu$ 或更短了。

(五)橫切面時，肌節部位顯出一種格子狀結構，而且有不同的形式，可以推測出Z線是一種動態結構。

## 七、結論

肌肉收縮過程中，粗肌絲利用其橫橋或棘與鄰近細肌絲相銜接，粗肌絲往前移動作拋擊狀，肌肉收縮之力量，由此種齒輪式接合，使得肌絲彼此互相滑動，而將細肌絲由外側拉進來內側，此過程之能源供應來自ATP。

在肌肉鬆弛時，所有粗肌絲與細肌絲皆分離，而使兩種肌絲分別往後滑行回到原先位置。通常神經刺激傳到肌原纖維後，引起收縮，這是因為刺激使肌纖維膜去極化（指藉著離子在膜內外互相移動，引起電位差的改變），內部引起 $\text{Ca}^{++}$ 由內質網釋出而到細胞質中，與細肌絲結合激活而粗肌絲之橫橋上有酶使：



而釋出能量可用於橫橋上之附著—釋放—附著之齒輪咬合動力，使粗肌絲與細肌絲互相滑動——收縮結束， $\text{Ca}^{++}$ 返回內質網，肌肉於是開始放鬆。

再研究骨骼肌細胞收縮之特性是依照全或無定律（All or None Law），未達足夠刺激則全不收縮，若有足夠刺激則肌纖維作全力收縮，而整塊肌肉收縮力量大小，取決於參加肌肉收縮的肌纖維數目多寡而定。

赫胥黎（Huxley）及其他生物學者，已證實在收縮期間，肌絲保持原來長短，只是粗肌絲與細肌絲相互滑動而已。但是一般咸信由肌動蛋白組成的細肌絲伸入A帶而且由肌凝蛋白組成的粗肌絲兩端接近Z帶而使得A帶中央H帶變窄。

本項模型試圖藉粗橡皮筋解釋橫橋構造，利用外來動力使肌纖維模型中的單位——肌節能縮短，乃由於模型中，粗細藤條間的相互滑動。

我們收集有關肌纖維構造及功能的資料並加以整理、重新探討，並且借助於電子顯微鏡有關肌纖維的構造圖片，設計出簡單實用的模型，全部材料之費用，一組約在五百元左右，是一件可行性甚高，有助於教學相長的自製模型，可加以推廣及使用。至於模型中尚有一些細節，值得再加以改良，例如橫橋的材料選擇，無法表示反應點等，就有待先進的指正，請致函花蓮高中，謝謝！

1986. 3. 30. 于花中

## 八、參考資料

- |                    |        |
|--------------------|--------|
| (一)組織學 (Histology) | 南山堂出版社 |
| (二)普通動物學           | 環球書社   |
| (三)生物學             | 環球書社   |
| (四)新生物學            | 中國書局   |
| (五)高中生物第二冊         | 國立編譯館  |
| (六)基礎生物            | 國立編譯館  |

## 評 語

本件作品以電算機 Simulation (模擬) 方式來表達橫紋肌收縮的模型，頗富創意，表達方式也相當生動，對幫助學生了解肌肉收縮的方式極具實用價值。惟本項「模擬」之呈現手法，仍相當簡單，程式設計亦無特殊傑出之處，就生物學概念之研究方面，主題尚缺乏創意，若能將各項與肌肉收縮有關之因素，於設計「模擬」模型時，考慮稍周全些，將更具實用價值。