

# 心肌的活動電位

## Action Potential of Cardiac Muscle

郭麗香

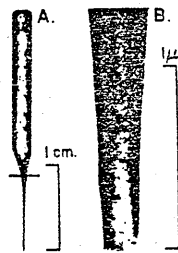
### 一、緒論

細胞處於靜止狀態下，細胞膜內外分別聚集正負二種電荷，膜外為正，膜內為負，產生了所謂的靜止膜電位（Resting membrane potential）。此時細胞呈極化狀態，一旦細胞膜受刺激，離子滲透性發生改變，細胞產生一連串電位變化，稱為動作電位或活動電位（Action Potential，簡稱AP）。心肌的活動電位在生理研究上具重要意義，故本文針對此方向加以討論之。

### 二、器材裝置及記錄方法

有關心肌活動電位記錄方式是採用細胞內微細電極記錄法（Intracellular microelectrode recording）。

所謂微細電極（microelectrode）是使用內徑 $1.0 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 的細玻璃管製成，使其中央部份受高熱熔化後向上下或左右急速牽引，使先端極為尖銳，以往使用單管，失敗率較高，因為還要灌入 $3\text{M KCl}$ ，現在皆改用同心雙管，成功率極高。這種微細電極先端極細，口徑只有 $0.5 \mu\text{m}$ 左右（圖一），可用電阻器或其他類似儀器測得電極之電阻大小，因此很容易插入細胞內，（通常記錄心肌電極之電阻值為 $15 \sim 30 \text{ M}\Omega$ ）。



圖一：微細玻璃電極

以冷血動物的青蛙、蟾蜍或溫血動物的老鼠、家兔、雞胚等作實驗材料較好，且普遍。記錄時，將心肌保存於心肌浴槽內，心肌浴槽大小有如火柴盒至名片盒等，使用這種浴槽目的在於使心肌之生理活性能維持許久，讓其充分浸在生理鹽水中，不至乾涸。若是心肌標本來自溫血動物，則須在心肌浴槽周圍裝設恆溫水箱，使浴槽中之灌流液能保持一定的溫度，可先於此槽中放置參考電極（reference electrode）和刺激電極（stimulus electrode），以便記錄。

心肌標本保存於生理鹽水中，其組成以心肌標本之滲透壓及各種離子之組成爲依據，儘量與體液相同，目的欲使此標本置於體內一樣的環境，生理鹽水因動物種類不同而異，有下列幾種常見的：(A) Ringer 氏液（適於青蛙、蟾蜍等兩生類）

NaCl	6.0	CaCl <sub>2</sub>	0.10	(單位：g/l)
KCl	0.075	NaHCO <sub>3</sub>	0.10	

(B) Rock 氏液（適於溫血動物）

NaCl	9.2	NaHCO <sub>3</sub>	0.15 ~ 0.67	(單位：g/l)
KCl	0.42	glucose	1.0	
CaCl <sub>2</sub>	0.23			

(C) Tyrode 氏液（適於溫血動物）

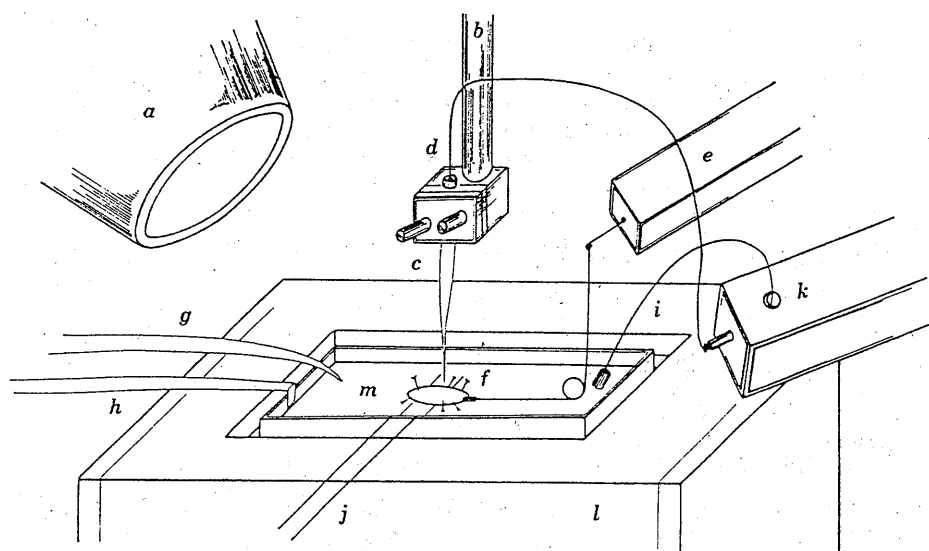
NaCl	8.0	NaHCO <sub>3</sub>	1.0	
KCl	0.2	MgCl <sub>2</sub>	0.1	
CaCl <sub>2</sub>	0.2	NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.05	(單位：g/l)
		glucose	1.0	

以上各液之 PH 值爲 7.3 ~ 7.4，以鹽酸調節之。

先取離體心臟，置於盛有充氧之生理鹽水的培養皿中，剪開心臟，使心肌內膜朝上，用細鋼針固定心肌於浴槽之腊板上，可見心肌仍規律跳動。

然後將參考電極及刺激電極置放在浴槽內，並將備用之微細玻璃電極接在記錄電極（record electrode）—Ag-AgCl 電極上，藉著微量推進器（microdrive）之控制，以 1 μm 左右之距離升降，使微細電極徐徐下降，直到插入心肌細胞中，利用照明設備和放大鏡（或解剖顯微鏡）可觀察到玻璃電極與生理鹽水之水面接觸，以及心肌跳動之情形，而此心肌活動電位訊號可經微電極前置放大器（microelectrode preamplifier）

放大轉送，顯示於示波儀（oscilloscope）之螢光幕上，再以拍立得相機拍下活動電位曲線圖形。示波儀之掃瞄可分快速和慢速來記錄，如此記錄之數據有助於實驗結果之分析。整個裝置如圖二：

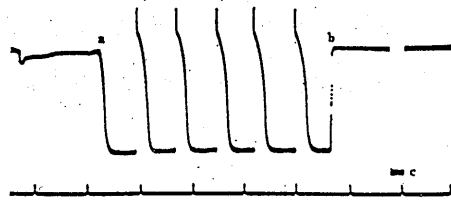


圖二：裝置圖

- |                |                  |         |
|----------------|------------------|---------|
| a 放大鏡          | b 微電極推進儀         | c 玻璃微電極 |
| d Ag - AgCl 電極 | e 心肌張力轉換器        | f 心肌    |
| g 入水孔          | h 出水管            | i 參考電極  |
| j 刺激電極         | k 微細電極增幅儀（僅示探索子） |         |
| l 恒溫水槽（38℃）    | m 心肌浴槽           |         |

### 三、結果

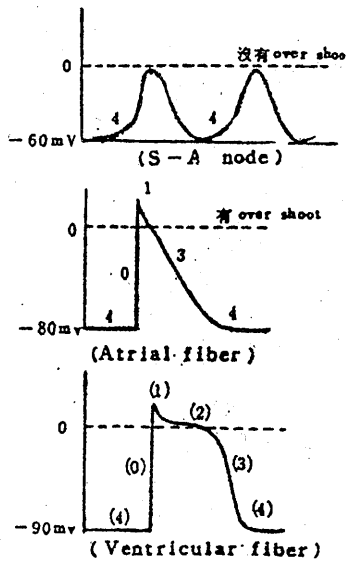
(-)在示波儀之螢光幕上，當電極往下插時，可見輝點“突然”向下方墜下，這表示微細電極已成功插入細胞內，接著可看到一系列的心肌活動電位圖，如圖三：



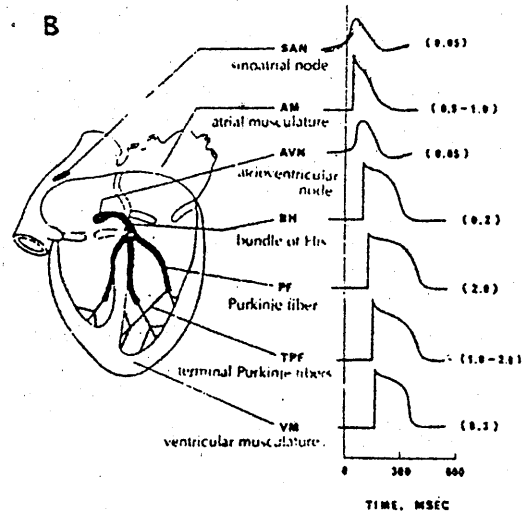
圖五：在示波儀上可看到的狗柏金氏纖維之活動電位。

a. 未刺入前 (0 電位)。a-b. 活動電位 (注意 overshoot)。b. 電極拉出後之電位 (0 電位)。c. -100mV (校正)。(下) 時間 (每一間隔為一秒)。

(二) 在心肌不同部位記錄到各種不同的活動電位 (A P) (圖四)



A. 心肌活動電位的各期



B. 心肌各部分之電位特徵

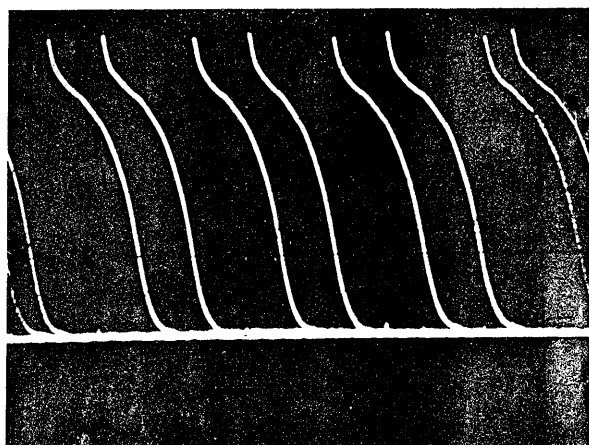
圖四：A - 竇房結 (SA node) 之 A P

心房肌之 A P

心室肌之 A P

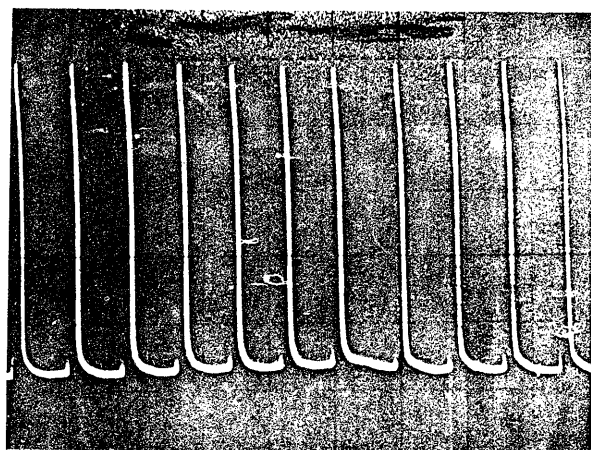
B - 不同部位 (心肌) 記錄之 A P

(三) 下圖是由示波儀上拍攝心肌活動電位的實際拍立得相片。

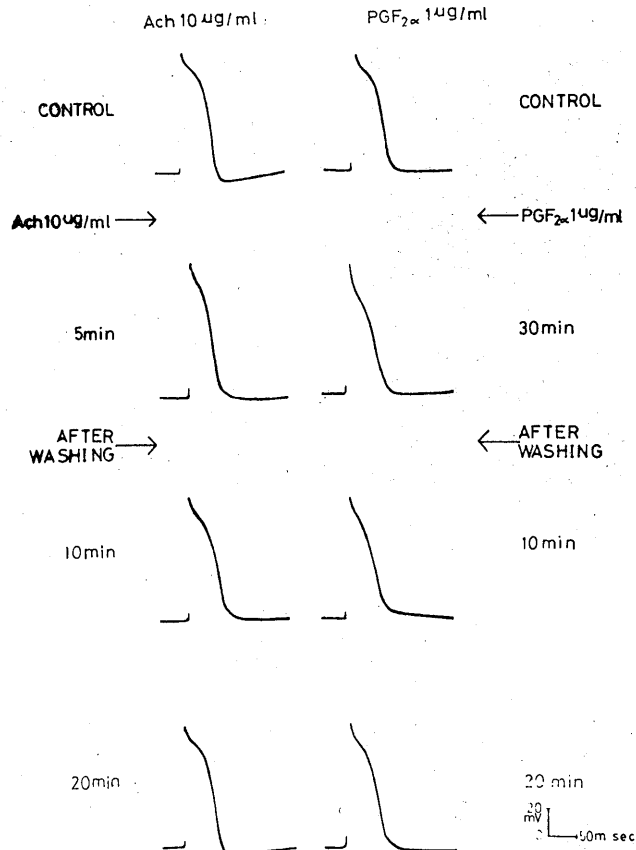


圖五：雞胚心房肌之正  
常活動電位

A 快速



B 慢速



圖六：12天雞胚心肌之活動電位圖

左：30℃, Ach (10 μg/ml) 處理和清洗的圖形

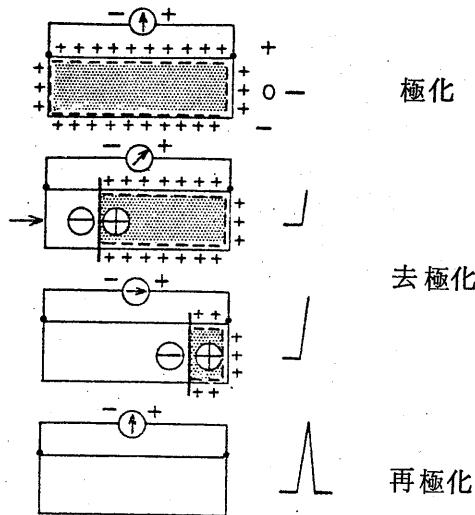
右：30℃, PGF<sub>2</sub>α (1 μg/ml) 處理和清洗的圖形

(Ach : 乙酰胆胺  
PGF<sub>2</sub>α : 前列腺素F<sub>2</sub>α)

#### 四、討論

生物細胞膜是一層具有選擇性的半透膜 (selective semipermeable membrane) 能阻止離子自由進出細胞，膜上的分子定向排列成一個強而有力的電場，能吸引或排斥帶電的離子，再加上離子幫浦 (ion pump) 能夠維持胞內外離子濃度差異，因此細胞膜內外造成了電位差，此即所謂“膜電位” (membrane potential)，細胞在靜止時所測得的電位為“靜止膜電位” (resting membrane potential)，當細胞興奮時所測得的電位稱為“活動電位” (action potential)。通常心肌之靜止膜電位為-80

~-90 mV，細胞外帶正電，內帶負電，呈極化現象 ( polarization )，一旦細胞膜受刺激，膜對鈉離子的通透性增加，大量鈉離子由細胞外進入細胞內，使細胞內變為帶正電，稱此狀態為去極化現象 ( depolarization )，細胞失去原有的極化現象。就在去極化現象發生後的一剎那，細胞膜對鈉離子的通透性降低，同時對鉀離子的通透性大為增加，使細胞內之鉀離子大量湧出細胞外，細胞內正電逐漸減少而胞外正電增加，於是恢復原來的外正內負的極化現象，稱此為再極化現象 ( repolarization )。活動電位可簡單分為這三種現象，故其發生之程序可以下圖解釋之：



整個心肌活動電位曲線可細分幾個期 ( phase )：

a 急速去極化 ( rapid depolarization ) 又叫上升期 ( upstroke phase ) 或 0 期 ( phase 0 )：是由於鈉離子快速進入細胞內所引起，鈉離子除了由快速道進入細胞產生快速入內電流，導致上升期上升，尚有慢速道進入，產生慢速入內電流，以維持細胞膜在去極化狀態，上升期時間很短，持續僅數毫秒，電位可達正 20 ~ 30 mV。

b 急速再極化期 ( rapid repolarization phase ) 又叫第一期 ( phase I )：是由於氯離子通道的開啓，產生入內氯離子電流及快速鈉離子通道的關閉，減少入內鈉離子電流，造成快速再極化，因為氯離子帶負電，所以有恢復極化的作用。

c 高原期 ( plateau phase )，又叫第二期 ( phase II )：是由於慢速入內電流所引

起，而該電流主要是由鈉離子及鈣離子通過慢速離子通道所形成。

d 終了再極化 (final repolarization) 又叫第三期 (phase III)：是外出電流超過入內電流，就可引起再極化，此期是鉀離子通道開啓的結果。

e 舒張期去極化 (diastolic depolarization) 又叫第四期 (phase IV)：具有節律點 (pacemaker) 的細胞，在舒張期能夠自動發生去極化，一旦達到閾值電位 (threshold potential) 就會引發活動電位的產生。

由結果(一)(二)(三)可更進一步了解活動電位圖形之含意，在結果(二)顯示當記錄心肌之位置不同，如：心室肌之 A P 是具有完整的各期，而心房肌缺少 phase II，竇房結 (SA node) 缺少 phase I & II，且 phase IV 呈斜坡上升，這些都具有其生理上不同的意義。心室肌通常強而有力收縮，故具一明顯的高原期，此時鉀離子的流出量很少。SA node 其靜止膜電位比一般心肌低，因具鈉離子高度傳導力，很快滲出，故引起其自動興奮，而 phase IV 此期即  $\text{Na}^+$  之滲出 (Na leakage)。

有關活動電位與細胞膜對鈉、鉀離子傳導度之關係，可由下圖表示之，當去極化發生時，鈉之傳導度大為增加，再極化發生時，鉀之傳導度大為增加。

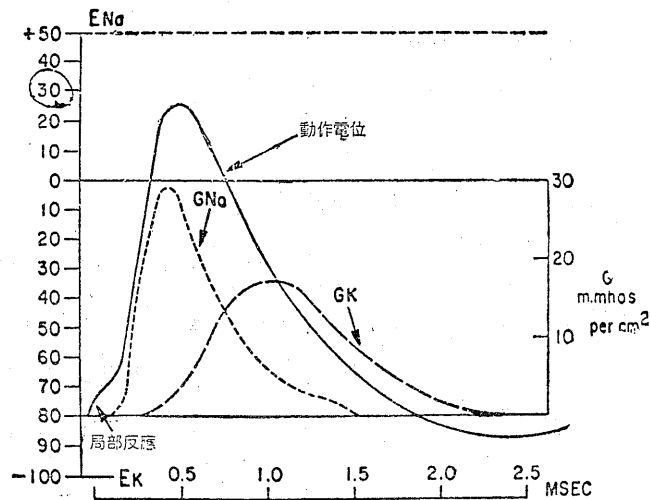


圖 4-8. 動作電位與細胞膜對鈉及鉀離子傳導度之關係圖  
 $E_{\text{Na}}$  鈉離子的平衡電位,  $E_{\text{K}}$  鉀離子的平衡電位,  $G_{\text{Na}}$  細胞膜對鈉離子的傳導度,  $G_{\text{K}}$  細胞膜對鉀離子的傳導度。



當心肌受外來因子，如：藥物之影響，會改變其離子的傳導度使活動電位之曲線，包括高度、寬度等皆受改變，如結果(四)，以乙醯胆胺 (Acetylcholine; Ach) 處理，使細胞膜對鉀離子的傳導度更為增加，於是再極化容易發生，整個 A P 之寬度變小，即 A P 之 duration 縮短，同時 A P 高度變大，鈉離子傳導度增加，去極化增大，形成過極化 (hyperpolarization) 的現象，於是心跳速率變慢。另外前列腺素  $F_2\alpha$  (PGF<sub>2</sub> $\alpha$ ) 亦有類似的結果，有關心肌活動電位在生理上意義極深，對於它的研究有待更進一步的探討。

### 參考資料

1. 吳京一，微電極法簡介—心肌細胞興奮之記錄 科學月刊第十三卷第二期 P. 24 ~ 28 (1982)。
2. 周先樂，生理學 P. 30 ~ 33 (1973)。
3. 劉華茂，蓋氏生理學 P. 90 ~ 99 (1975)。
4. Brobeck J.R. Best & Taylor's physiological basis of medical practice.  
9th edition 349-354(1973).  
The Williams & Wilkins Co. Baltimore, Maryland.
5. Coroboeaf, E., G. Obrecht-Coutris, and G. Le Douarin  
Acetylcholine and the embryonic heart.  
Am. J. Cardiol. 25:285(1970)
6. Hoffman B.F. and E.E. Suckling.  
Effect of several cations on transmembrane potentials of cardiac muscle.  
Am. J. Physiol. 186:387-394(1956)
7. Hoshiko T. and N. Sperelakis  
Components of the cardiac action potential  
Am. J. Physiol. 203(2):258-260(1962).
8. Lee. Y.H.  
Cardiac electrophysiology  
Chang Gung Medical J. 2:34-47(1978)
9. Nakanishi, H. and H. Takeda.  
Effect of acetylcholine on the electrical activity of cultured chick

embryonic heart.

Jap. J. pharmacol. 19:543-550(1960)