心電図電極と誘導

1. 双極四肢誘導（Extremity Leads）

標準 12 誘導心電図の誘導に付いて考察を行う。四肢双極誘導は四肢の 2 点間の電位として測定される。この双極誘導はアイントーヘンによって導かれたのもで下記の通り表現される。

Lead I = 左手(L) − 右手(R)　　(1)；左手と右手間の電位

Lead II = 左足(F) − 右手(R)　　(2)；左手と右手間の電位

Lead III = 左足(F) − 左手(L)　　(3)；左足と左手間の電位

本式の意味は、電気回路として実装されることを示していて、Lead I は差動増幅器の(+)入力に左手(L)、(−)入力に右手(R)が入力されることを示している。

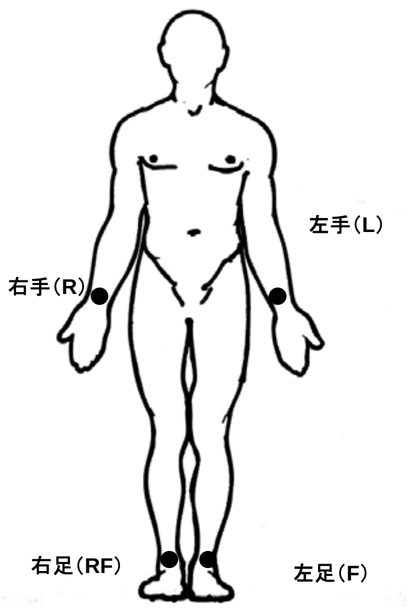


図 1 四肢電極の配置

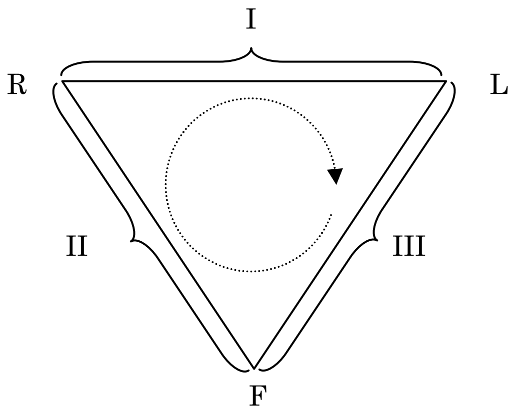


図 2 四肢電極の回路図

双極誘導はキルヒホッフの第二法則から次のように説明される。

$I + II + III = 0$　　(4)

ここでアイントーヘンの定義では II 誘導の極性は逆に定義されているので

$I - II + III = 0$　　(4')

$III = II - I$　　(4'')

として示される。つまり 3 誘導は独立しているのではなく、2 誘導すなわち例えば I 誘導と II 誘導のみで双極誘導を示すことができることになる。これがコンピュータ処理として考えると、I 誘導、II 誘導のみ処理することで良いことを示している。

これを(1)(2)(3)式から整理しておくと

$I = L - R$ と $II = F - R$

から

$$III = F - L = (F - R) - (L - R) = II - I \qquad (5)$$

で同様に示すことができる。

2. 単極四肢誘導(Augmented Extremity Lead)

ここでは一般に使用されている Augmented Extremity Leads について述べ、Noaugmented Extremity Leads については別途述べる機会に譲るとする。Augmented Extremity Leads は

$$\begin{aligned} aVR &= -\left(\frac{I+II}{2}\right) \\ aVL &= \left(\frac{I-III}{2}\right) \\ aVF &= \left(\frac{II+III}{2}\right) \end{aligned} \qquad (6)$$

で示される。これを I、II 誘導のみで示すよう工夫すると(5)式を使って

$$\begin{aligned} aVR &= -\left(\frac{I+II}{2}\right) \\ aVL &= \left(\frac{I-III}{2}\right) = \left(\frac{I-II+I}{2}\right) = \left(\frac{2I-II}{2}\right) \\ aVF &= \left(\frac{II+III}{2}\right) = \left(\frac{II+II-I}{2}\right) = \left(\frac{2II-I}{2}\right) \end{aligned} \qquad (7)$$

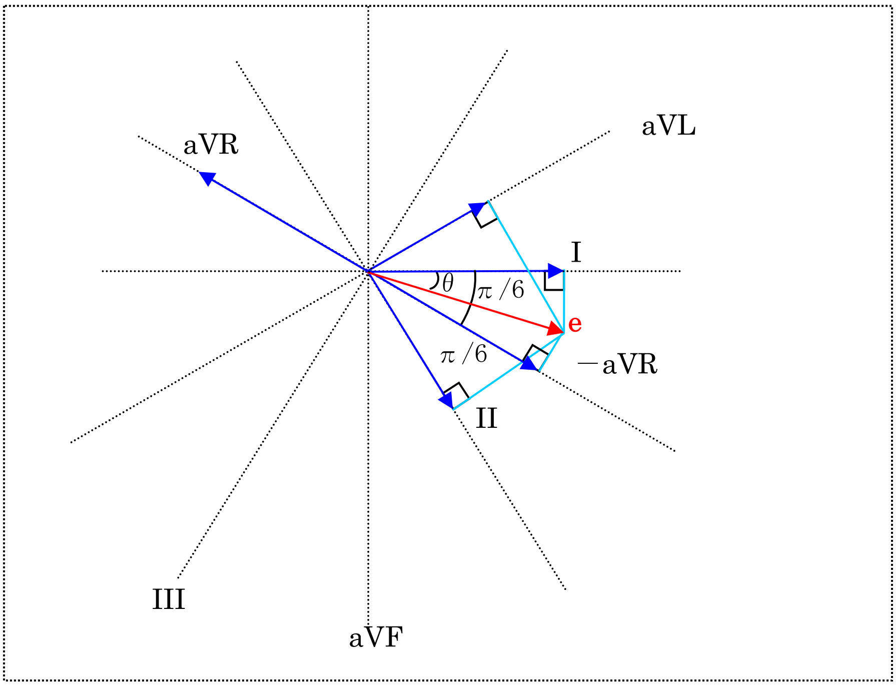
これを回路構成の視点から書き換えると

$$\begin{aligned} aVR &= -\left(\frac{I+II}{2}\right) = -\left\{\frac{(L-R)+(F-R)}{2}\right\} = -\left\{\frac{(L+F)-2R}{2}\right\} = R - \frac{L+F}{2} \\ aVL &= \left(\frac{I-III}{2}\right) = \left\{\frac{(L-R)-(F-L)}{2}\right\} = \left\{\frac{2L-(F+R)}{2}\right\} = L - \frac{F+R}{2} \\ aVF &= \left(\frac{II+III}{2}\right) = \left\{\frac{(F-R)+(F-L)}{2}\right\} = \left\{\frac{2F-(R+L)}{2}\right\} = F - \frac{R+L}{2} \end{aligned} \qquad (8)$$

(8)式から、例えばaVRは左手と左足の中点 $\frac{L+F}{2}$ と右手 R との電位差を示している。同様に aVL、aVF を求めることが出来る。

3. アイントーヘンの三角形の理論からの推論

アイントーヘンは以上四肢誘導を正三角形と仮定して説明している。１、２での回路論からの説明ではなく図３正三角形として考察する。



a. 第 I 誘導

$$I = e\cos(\theta)$$

b. 第 II 誘導

$$II = e\cos(\frac{\pi}{3}-\theta) = e\cos\left(\frac{\pi}{3}\right)\cos(\theta)+e\sin\left(\frac{\pi}{3}\right)\sin(\theta) = e\frac{1}{2}\cos(\theta)+e\frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta)$$

c. 第 III 誘導

$$III = e\cos\left(\frac{2\pi}{3}-\theta\right) = e\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right)\cos(\theta)+e\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right)\sin(\theta) = -e\frac{1}{2}\cos(\theta)+e\frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta)$$

以上の式から I、II、III 誘導の関係を求めると

$$II - III = \left\{e\frac{1}{2}\cos(\theta)+e\frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta)\right\} - \left\{-e\frac{1}{2}\cos(\theta)+e\frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta)\right\} = e\cos(\theta) = I$$

の関係により双極四肢誘導を導くことができる

d. aVR 誘導

$$aVR = e\cos\left(\frac{\pi}{6}-\theta\right) = e\cos\left(\frac{\pi}{6}\right)\cos(\theta)+e\sin\left(\frac{\pi}{6}\right)\sin(\theta) = e\frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\theta)+e\frac{1}{2}\sin(\theta)$$

で II 誘導を変形すると

$$II = e\frac{1}{2}\cos(\theta) + e\frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta) = \frac{1}{2}I + e\frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta)$$

$$II - \frac{1}{2}I = e\frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta)$$

$$e\sin(\theta) = \frac{2}{\sqrt{3}}\left(II - \frac{1}{2}I\right) = \frac{2}{\sqrt{3}}II - \frac{1}{\sqrt{3}}I$$

から

$$-aVR = \frac{\sqrt{3}}{2}I + \frac{1}{2}\left(\frac{2}{\sqrt{3}}II - \frac{1}{\sqrt{3}}I\right) = \frac{\sqrt{3}}{2}I + \frac{1}{\sqrt{3}}II - \frac{1}{2\sqrt{3}}I = \frac{\sqrt{3}\times\sqrt{3}-1}{2\sqrt{3}}I + \frac{1}{\sqrt{3}}II = \frac{1}{\sqrt{3}}(I + II)$$

$$aVR = -\frac{1}{\sqrt{3}}(I + II)$$

となり(7)式とは振幅特性が異なることになる

e. aVL 誘導

$$aVL = e\cos\left(\frac{\pi}{6} + \theta\right) = e\cos\left(\frac{\pi}{6}\right)\cos(\theta) - e\sin\left(\frac{\pi}{6}\right)\sin(\theta) = e\frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\theta) - e\frac{1}{2}\sin(\theta)$$

$$aVL = \frac{\sqrt{3}}{2}I - \frac{1}{2}\frac{2}{\sqrt{3}}\left(II - \frac{1}{2}I\right) = \frac{\sqrt{3}}{2}I - \frac{1}{\sqrt{3}}II + \frac{1}{2\sqrt{3}}I = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2\sqrt{3}}\right)I - \frac{1}{\sqrt{3}}II = \frac{2}{\sqrt{3}}I - \frac{1}{\sqrt{3}}II$$

$$aVL = \frac{1}{\sqrt{3}}(2I - II)$$

aVR と同様(7)式とは振幅特性が異なることになる

f. aVF 誘導

$$aVF = e\sin(\theta) = \frac{2}{\sqrt{3}}\left(II - \frac{1}{2}I\right) = \frac{1}{\sqrt{3}}(2II - I)$$

となり(7)とは振幅特性が異なることになる