

# 基礎心電図学

「永久の謎スフィンクス」に挑む！



名古屋大学医学部医学科四年生

川口 真一

心電図の原理は今なお明らかではなく  
教科書の説明はごまかしにすぎない

この謎を解くのは我々の使命である

- 心電図とは何か
- 心電図学の歴史
- 正常心電図の検討

# 自己紹介

名古屋大学医学部医学科四年生 川口 真一

- 1982年11月8日生まれ (30歳)
- 2006年 京都大学工学部物理工学科 卒業
- 2008年 京都大学大学院エネルギー科学研究科修士課程 修了
- 2011年 同 博士課程 中退
- 2012年 名古屋大学医学部医学科 三年次に編入学

Dropout!

以前の専門は量子物理学, 原子炉物理学

# 最初に確認

この分科会は「心電図学の初学者歓迎」という趣旨ですが  
あなたはどの程度 心電図のことを知っていますか？

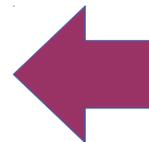
- EKGマスターである  
医師国家試験も楽勝！

Elektrokardiogramm  
ドイツ語で「心電図」の意

- 多少は勉強した  
典型的な心筋梗塞の心電図はわかる

- あまり知らない  
正常心電図なら説明できる

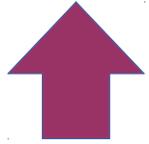
- 初心者です



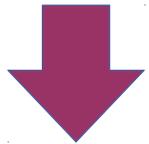
こういう人が多いと  
想定していますが……

# この分科会の趣旨

- 心電図の測定方法
- 各種の心臓疾患における典型的な心電図



大学で学ぶ



今日 学ぶ

- 心電図は いったい 何をみているのか？
- 正常心電図は どうして あのような波形になるのか？

普通の医師は  
知らないようなことを  
中心に扱います

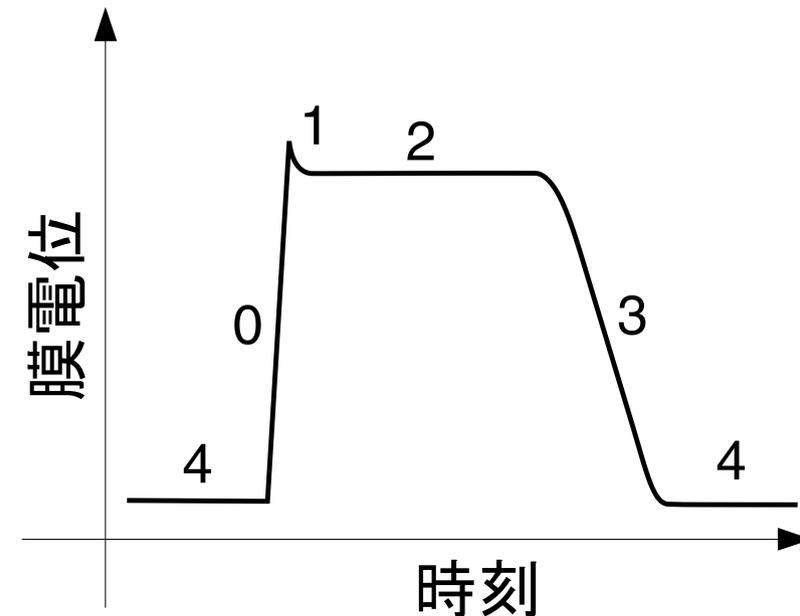
あくまで初学者向けの分科会なので  
遠慮なく発言や質問してください

- 心電図とは何か
- 心電図学の歴史
- 正常心電図の検討

# 心筋の電気的活動

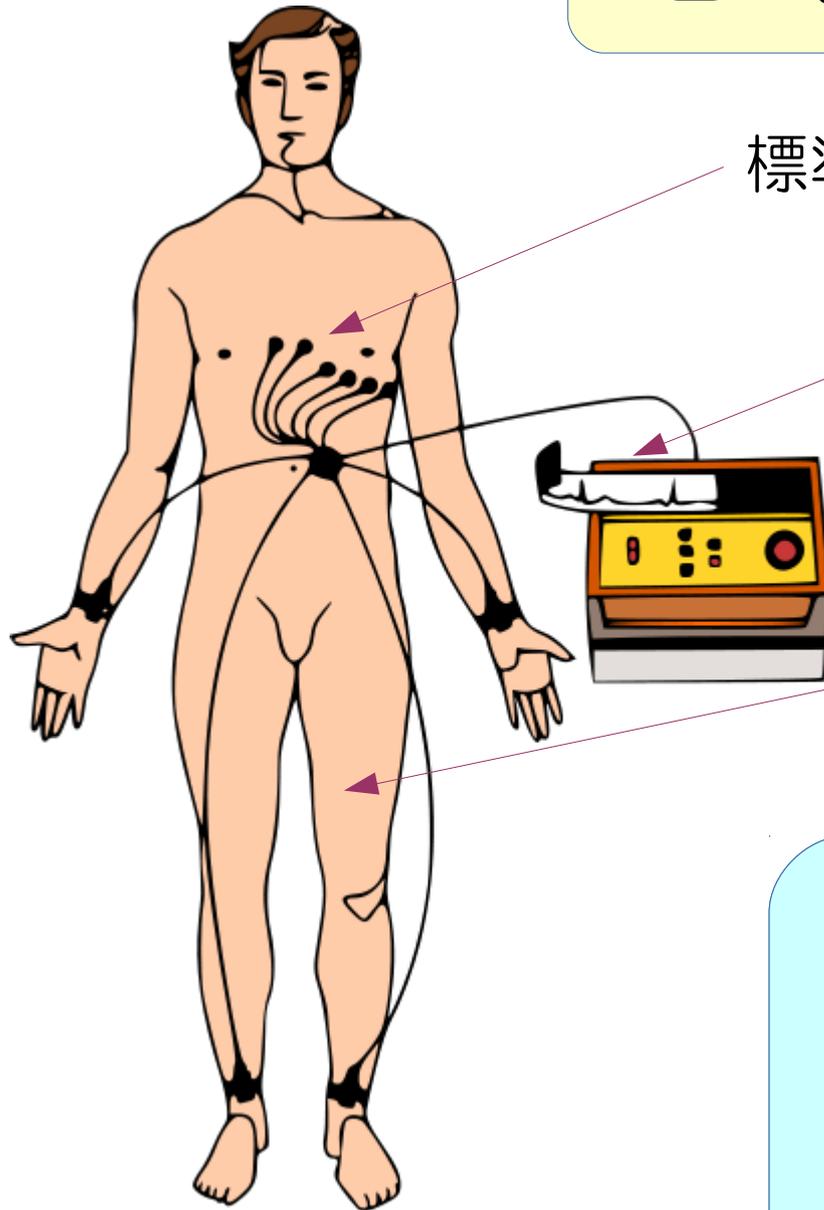
## 詳しい話は省略

- 静止膜電位は負である
- 電気的な刺激があると細胞外から細胞内に電流が流れる
- その結果 膜電位は正になる (興奮)
- 膜電位が正の状態がしばらく続く
- やがて細胞内から細胞外に電流が流れる
- 膜電位は負に戻る (再分極)



Wikipedia (英語版) より

# 心電図とは



標準的には10個の電極を装着する

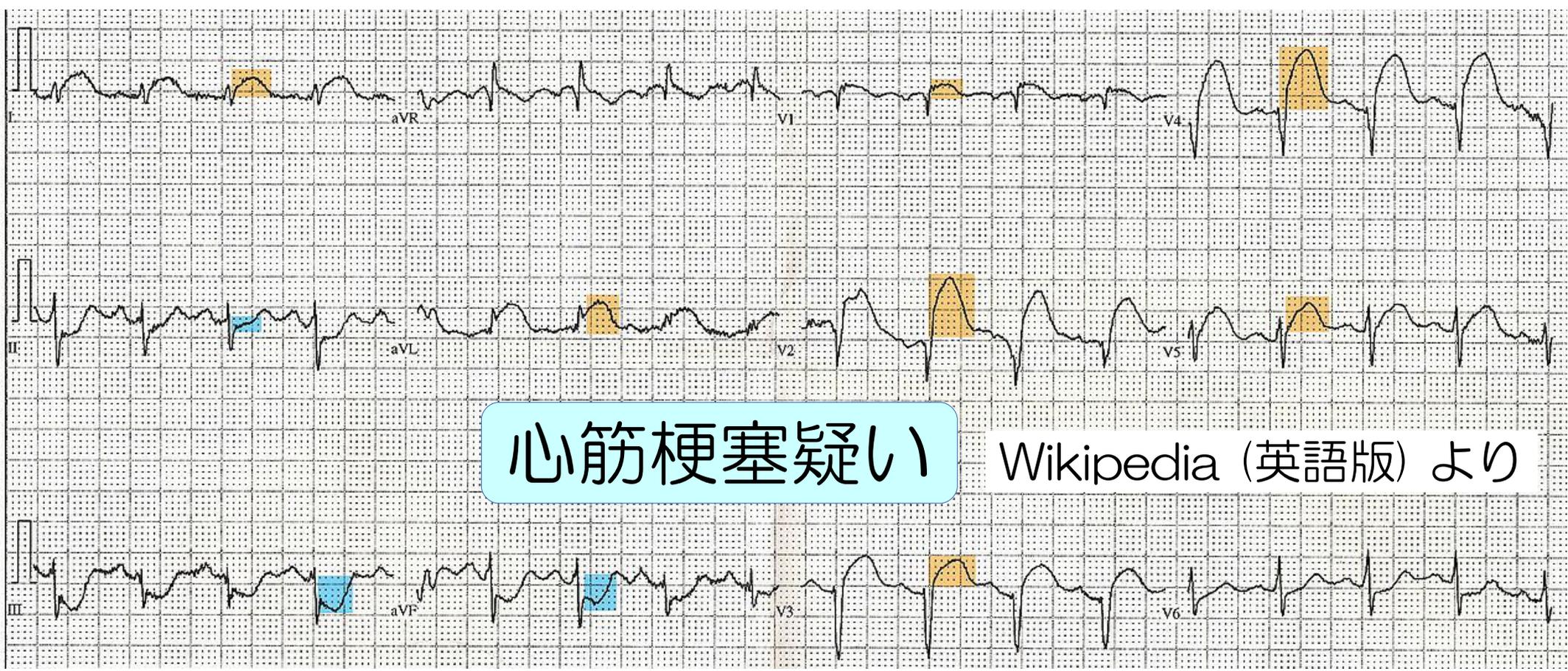
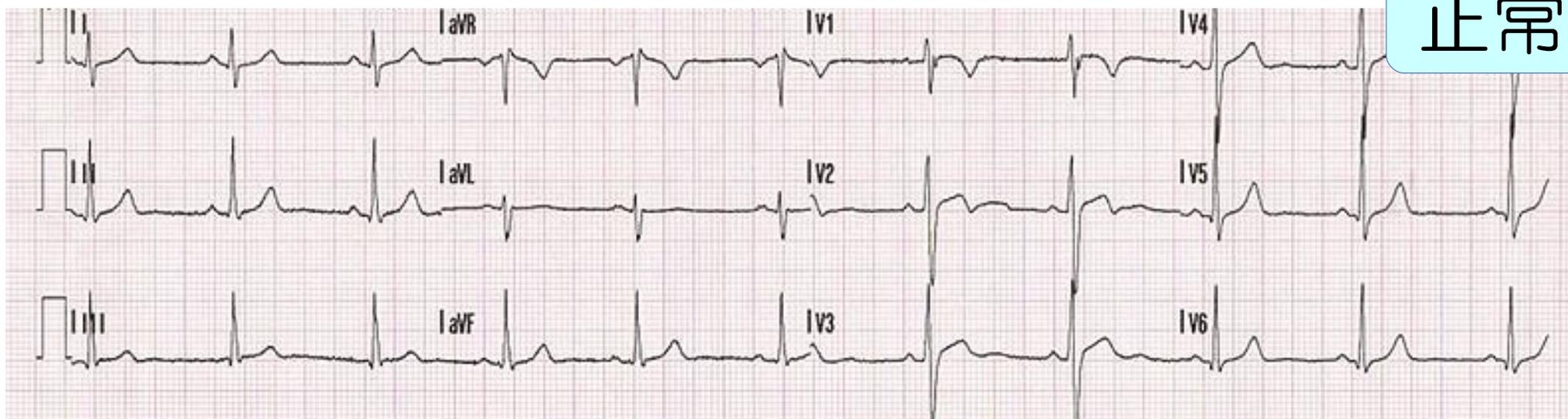
電位差(電圧)の  
グラフが記録される

下半身は脱衣の必要なし

グラフからなぜか  
心臓の疾患がわかる！

ふしぎ！

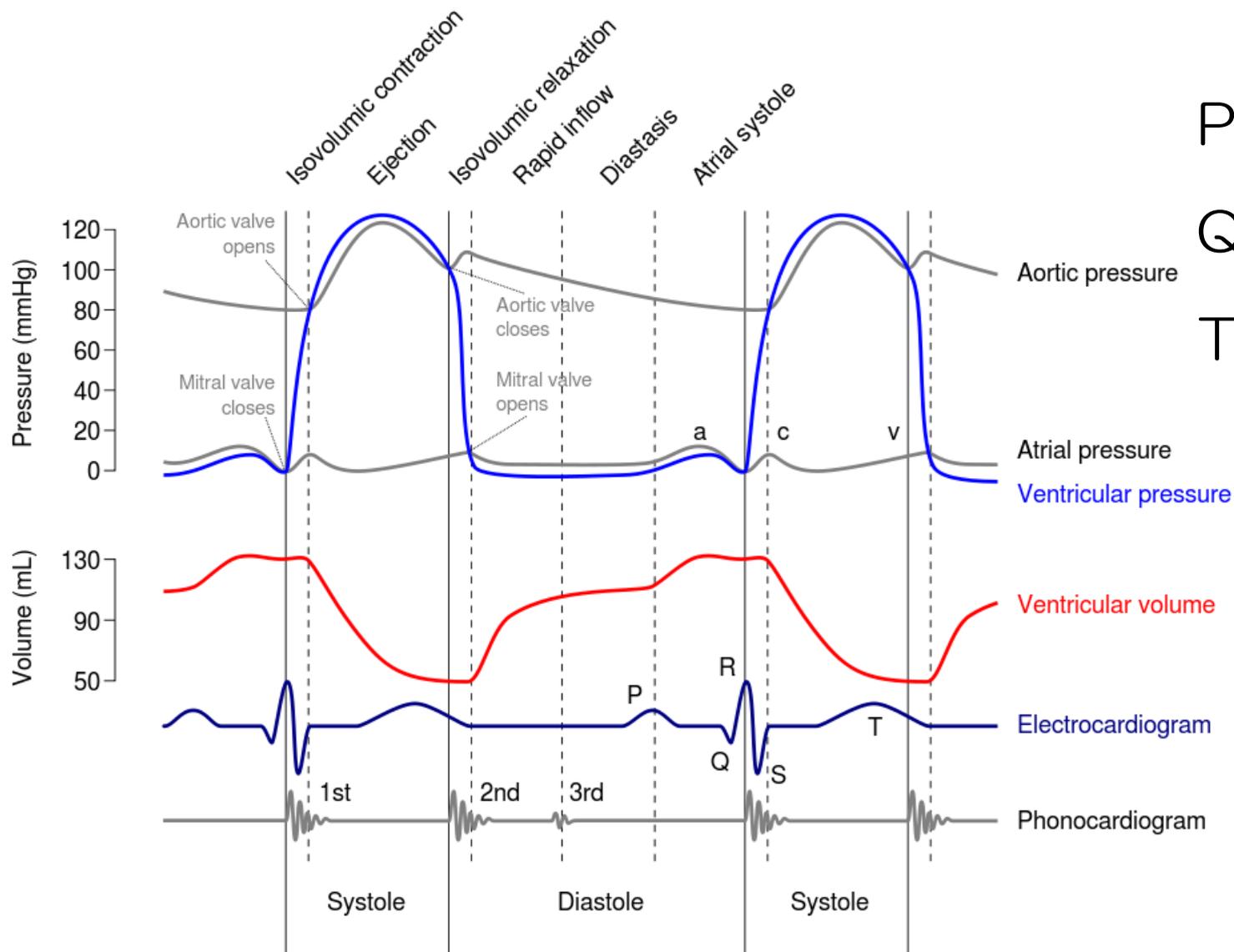
正常



心筋梗塞疑い

Wikipedia (英語版) より

# 心電図の解釈



P波は心房の興奮？

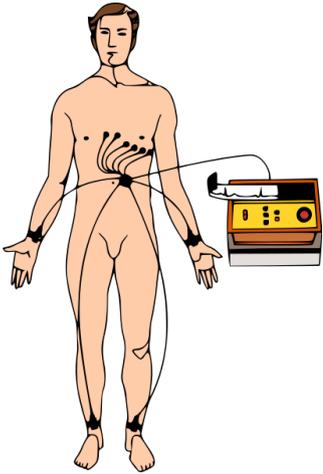
QRSは心室の興奮？

T波は心室の再分極？

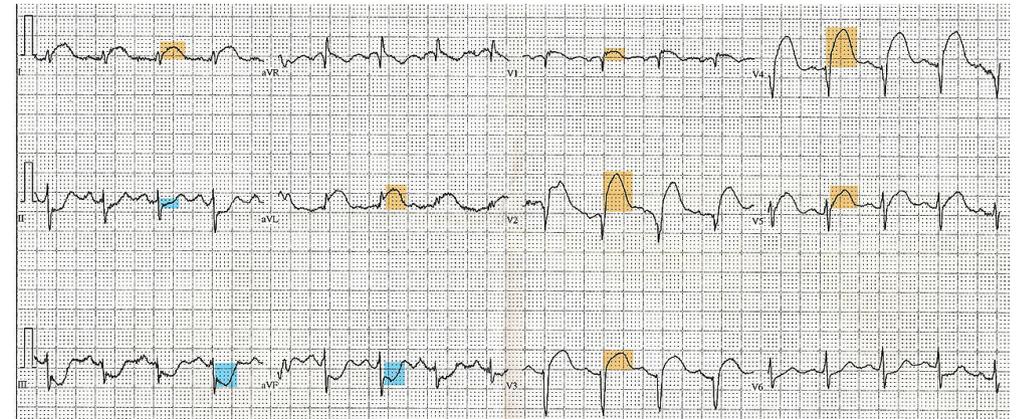
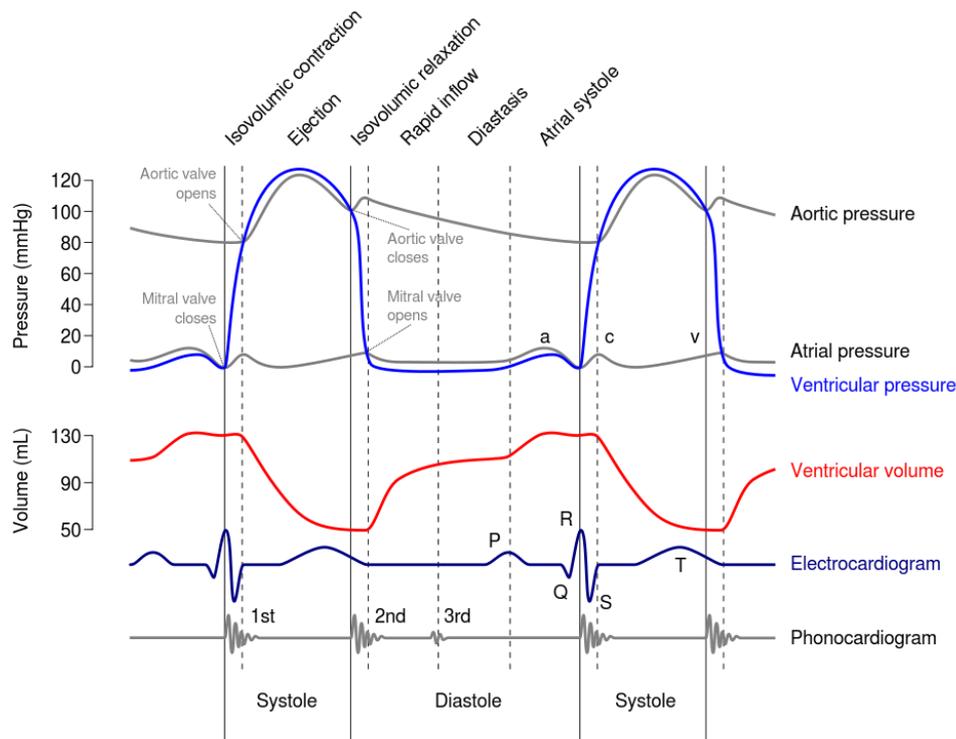
なんで???

教科書には  
書いてない……

# 心電図のまとめ



- 体表に電極を取り付けて電流を測るらしい
- 電流と心臓の活動は 深い関係にあるらしい
- 一部の心臓病は心電図からわかるらしい

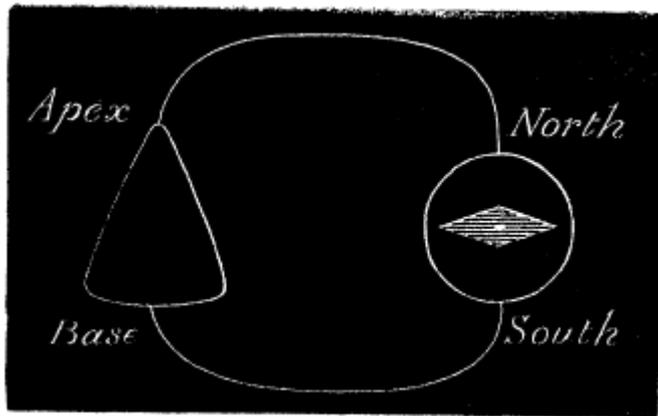


- 心電図とは何か
- **心電図学の歴史**
- 正常心電図の検討

Wallerian degeneration の  
Waller の息子

19世紀後半

Waller, A. D., et al.,  
*Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*,  
**178**, 215-256 (**1887**). (英国 王立協会の論文集)



心臓に検流計を直接  
つないで電流を調べる

Waller, A. D.,  
*Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*,  
**180**, 169-194 (**1889**).



仔猫の心臓から得られた謎の電流

# 心電図の先駆け

Waller, A. D., et al., *Journal of Physiology*, **8**, 229-234 (**1887**).

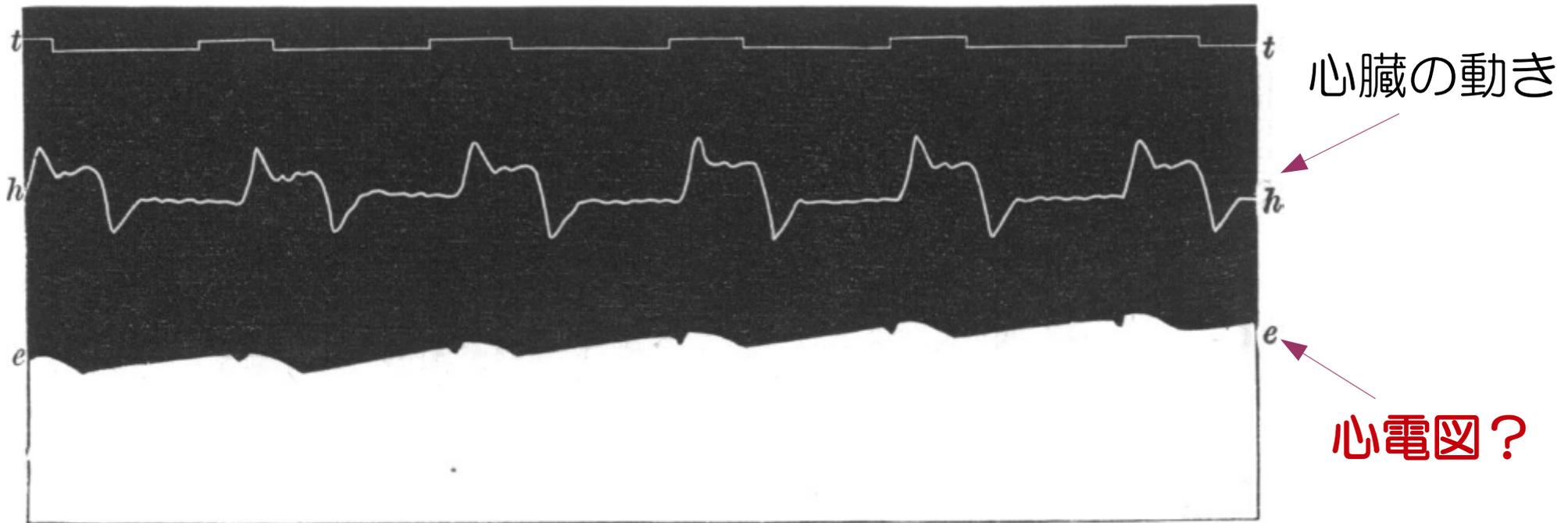


FIG. 1. Man. Heart led off to electrometer from front and back of chest (front to Hg; back to H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

*e.e.* electrometer. *h.h.* cardiograph. *t.t.* time in seconds.

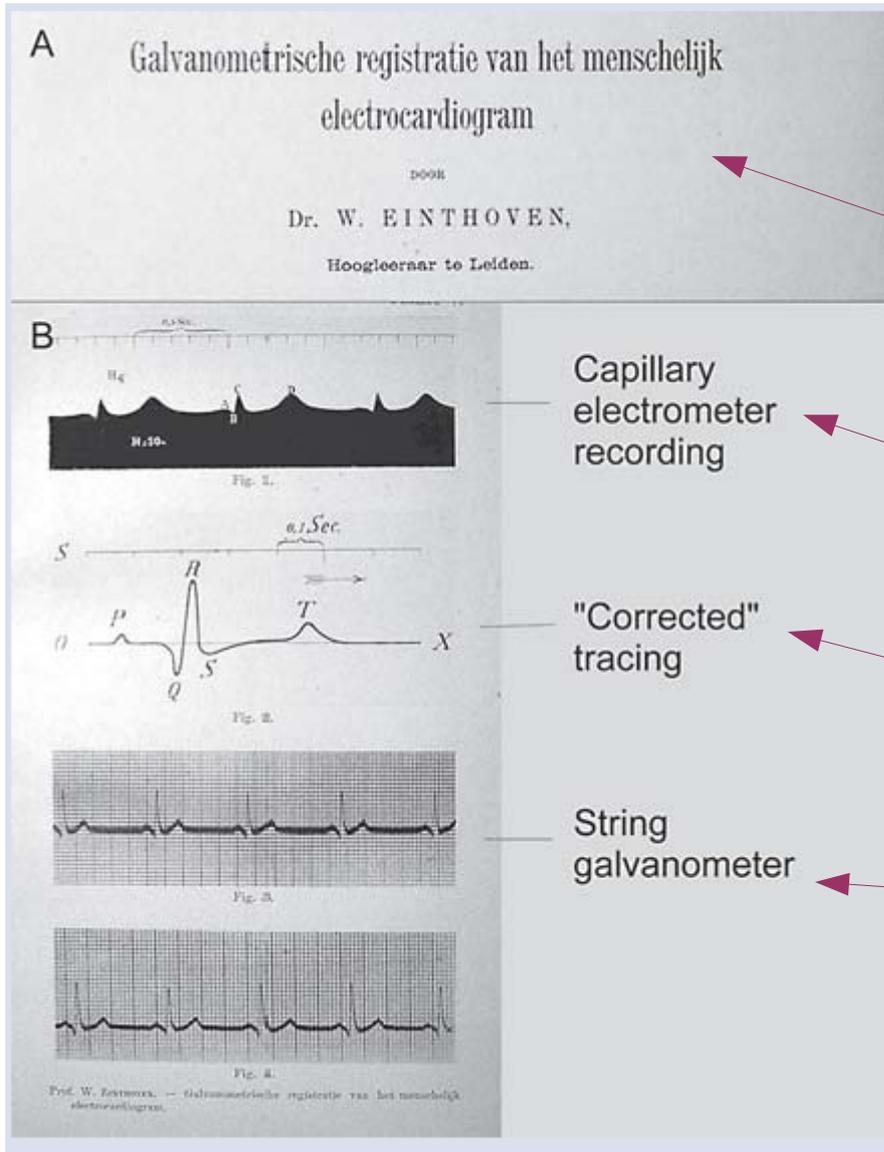
胸の前面と後面の間の電流を測定

ヨーロッパ中が大興奮！

# Willem Einthoven

オランダ人

Kligfield, P., *Cardiology Journal*, 17, 109-113 (2010). より転載



Einthoven による  
初めての心電図の報告 (1902年)

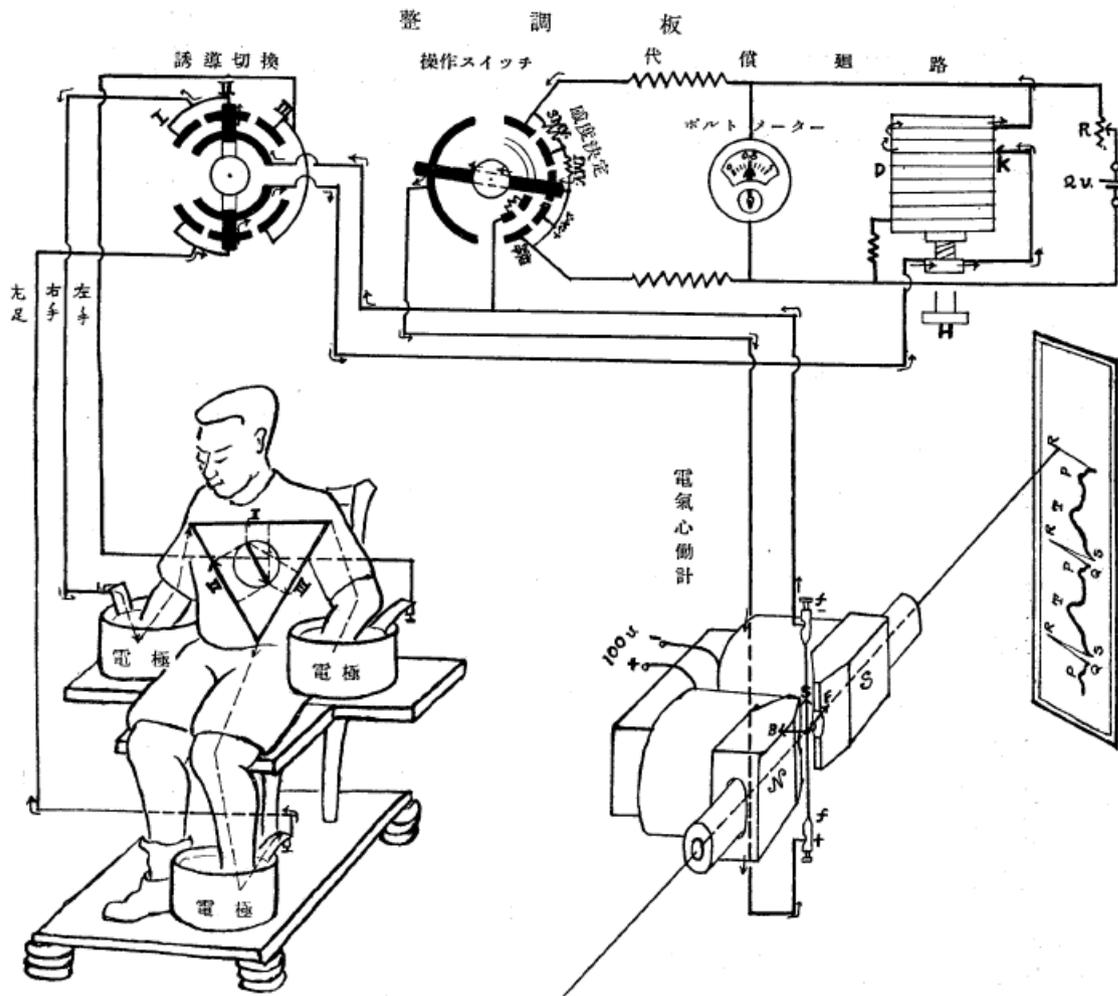
従来型の高性能検流計で  
測定した心電図

数学を駆使して補正した  
心電図

新型の超高性能検流計で  
測定した心電図

今日の心電図と同じ

# Einthoven の心電計



第Ⅰ誘導  
左手から右手への電流

第Ⅱ誘導  
右手から左足への電流

第Ⅲ誘導  
左手から左足への電流

各誘導による  
波形の違いを  
どう理解するか?

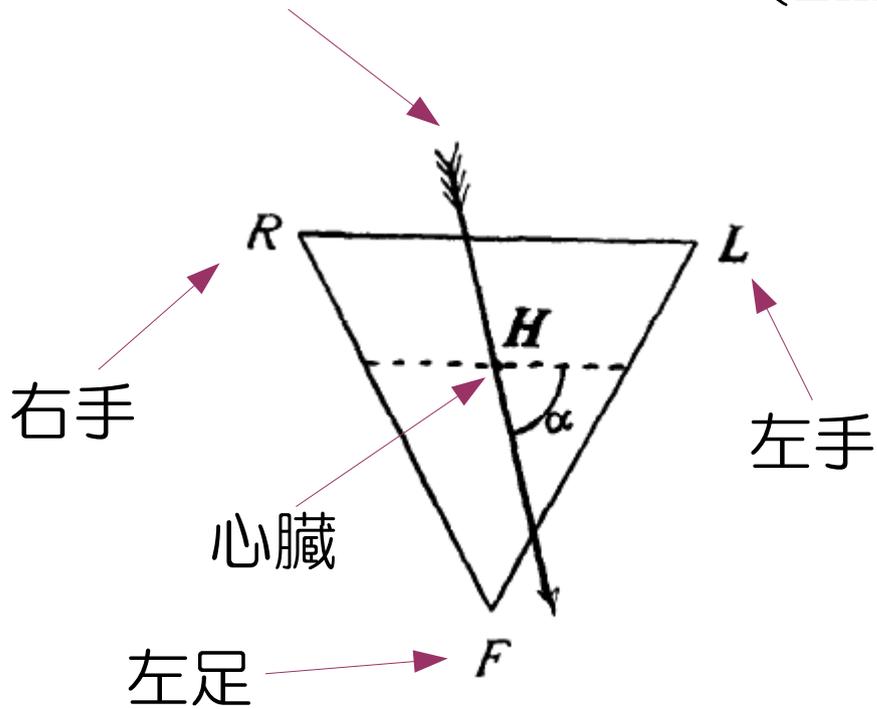
Einthoven の弦線電流計に據る Ekg. の撮影法

前川孫二郎, 臨床電気心働図講座,  
日本循環器病学, 1, p.149 (1935).

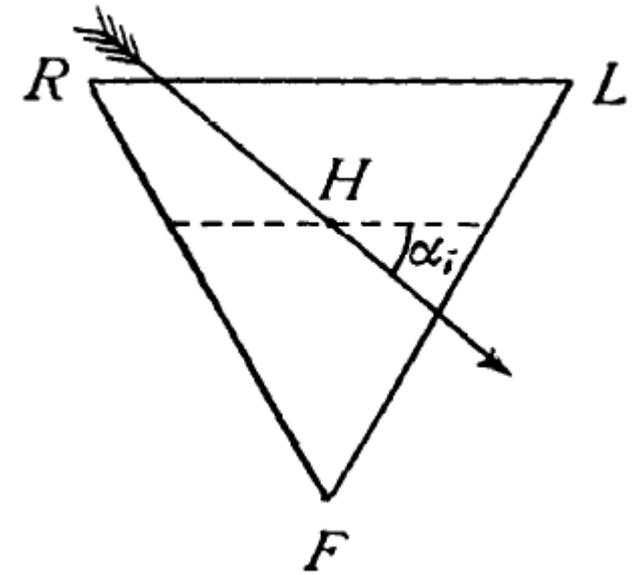
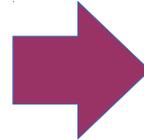
# Einthoven の正三角形

Einthoven, W., et al., American Heart Journal, **40**, 163-211 (1950).  
(Einthoven の1913年の論文の英訳)

電気軸  
(電流の向き反対)



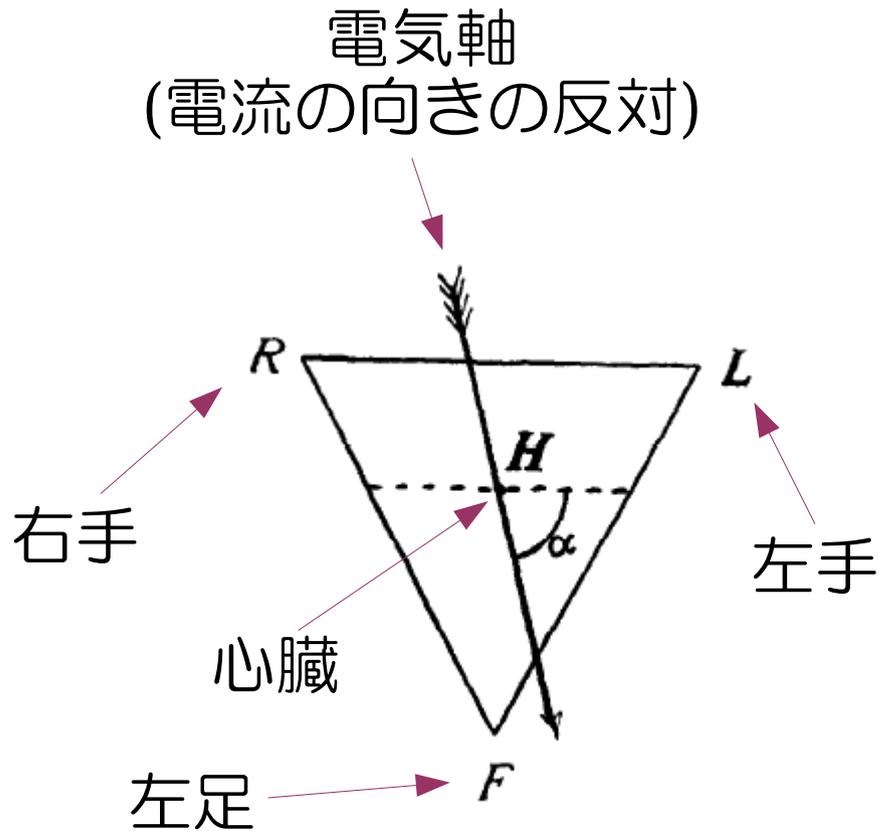
心臓の状態と  
ともに変化



- 心臓を中心とした正三角形
- 一方向に電流が流れている

どう思います？

# 疑問



- そんな大胆な近似をして良いの？
- どうして その向きに電流が？

学生A

「偉い先生がいろいろ研究して最終的にこれで十分だという結論になったのだろう」

学生B

「そんなデタラメな近似を使っているから医学の発展が止まってしまうのだ！」

Einthoven, W., et al.,  
American Heart Journal,  
40, 163-211 (1950).

# ここまでのまとめ

- 1887年 心臓の動きと連動して体表を流れる電流を Waller が報告
- 1902年 最初の心電図を Einthoven が報告
- 1913年 Einthoven が正三角形モデルを提唱
- どうして電流が流れるの？
- 正三角形モデルで良いの？

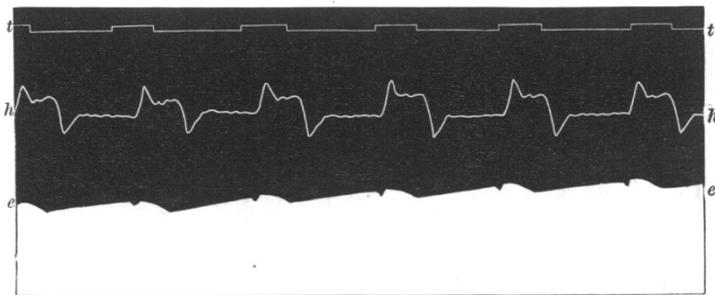
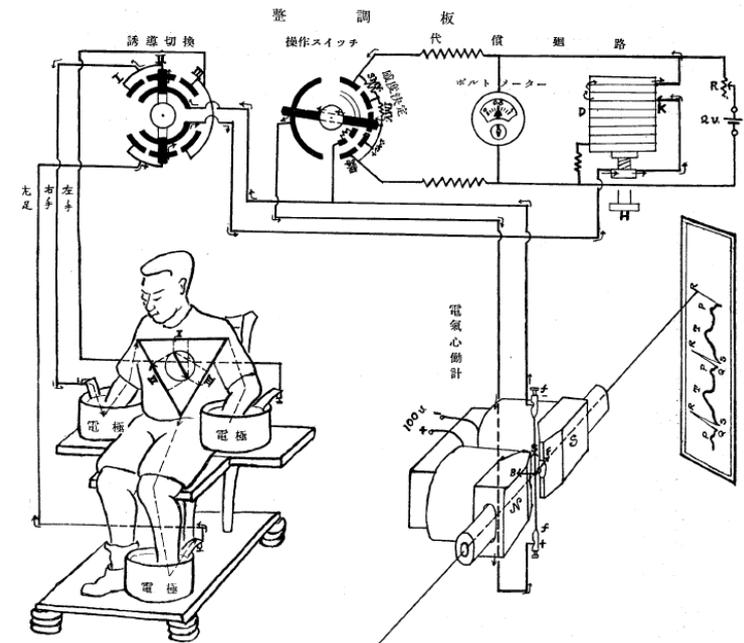
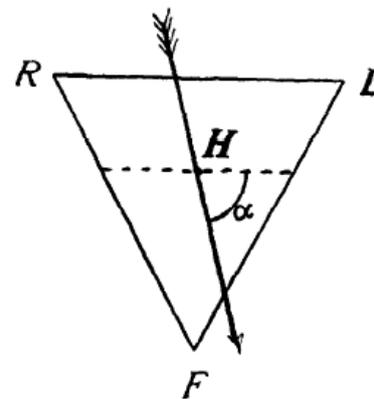


FIG. 1. Man. Heart led off to electrometer from front and back of chest (front to Hg; back to H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).  
e.e. electrometer. h.h. cardiograph. t.t. time in seconds.



Einthoven の弦線電流計に據る Ekg. の撮影法

どうして電流が流れるのか？

# Einthoven の意見

## 1913年の論文

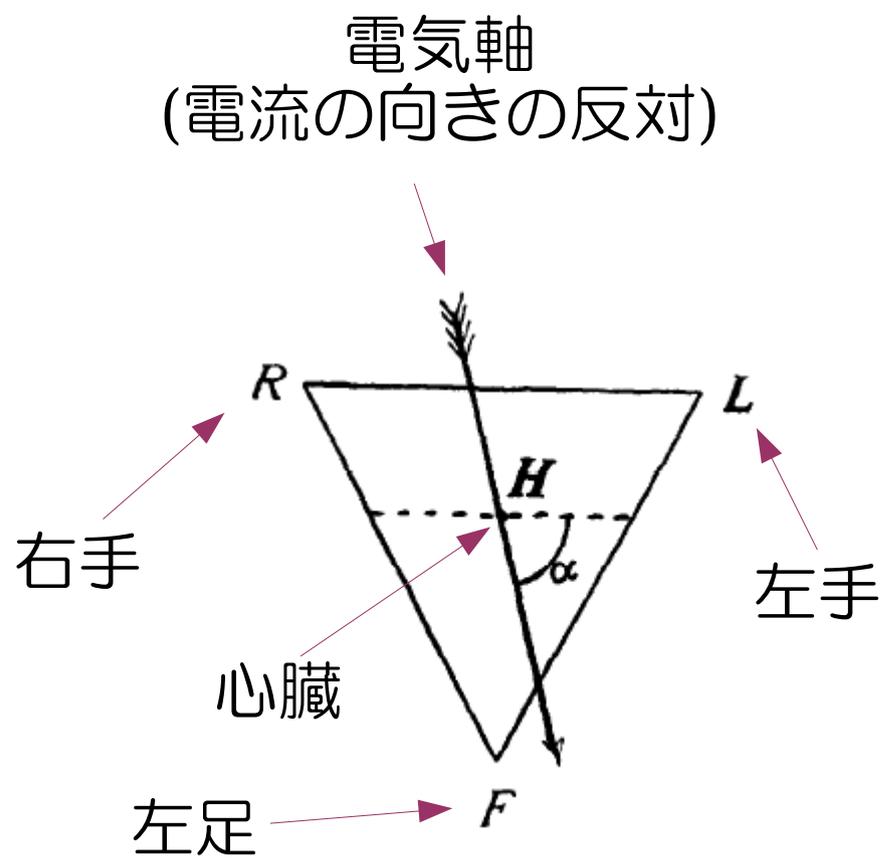
正三角形モデルを提唱するも  
電気軸の正体については言及なし

Einthoven, W., et al.,  
American Heart Journal,  
**40**, 163-211 (1950).

## 1921年11月21日の手紙

「正三角形の中心に双極子が存在すると暗に仮定していた」

Wilson, F. N.,  
American Heart Journal,  
**32**, 277-310 (1946).



「Wilson の中心電極」の  
あの Wilson

# 双極子

Geselowitz, D. B., *The American Journal of Cardiology*,  
14, 301-306 (1964).

電流は どう流れる？

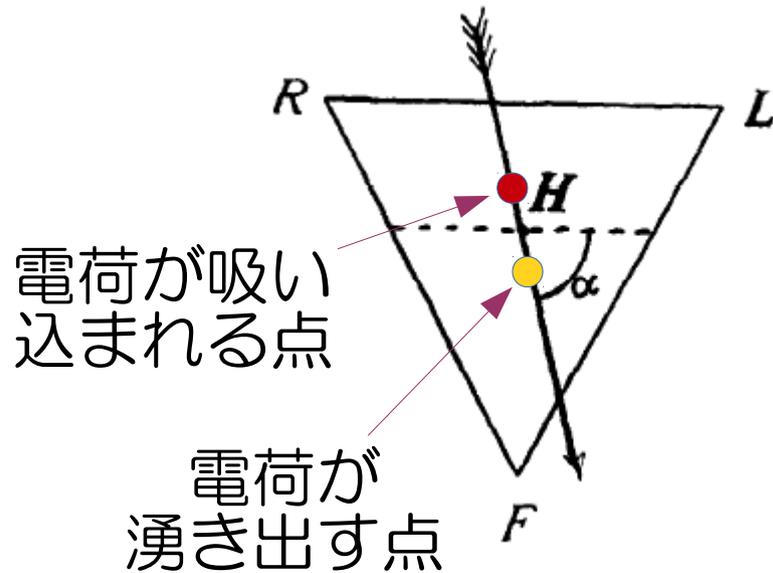


電荷が吸い込まれる点  
(sink)



電荷が湧き出す点  
(source)

# 電気軸の正体



1921年11月21日の手紙

「正三角形の中心に双極子が存在すると暗に仮定していた」

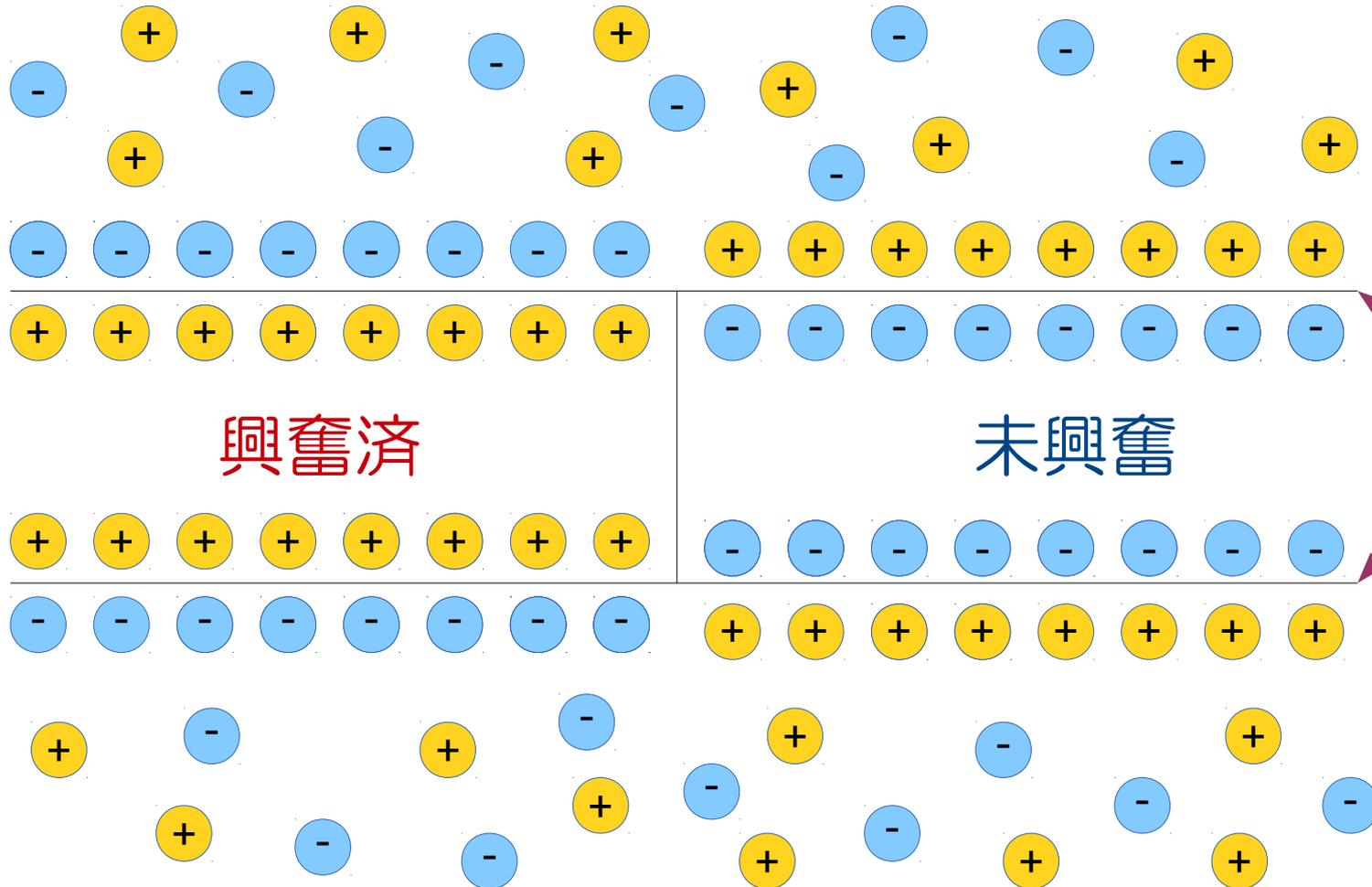
Wilson, F. N.,  
American Heart Journal,  
32, 277-310 (1946).

電荷が湧き出す点と  
電荷が吸い込まれる点を  
結んだものが電気軸である

どう思います？

# 双極子の正体 (1)

## 興奮の最前線における電荷分布



前川孫二郎,  
医学,  
昭和22年  
1月, 2月, 4月.

前川孫二郎,  
日本循環器病学,  
10, pp.44-45  
(1944).

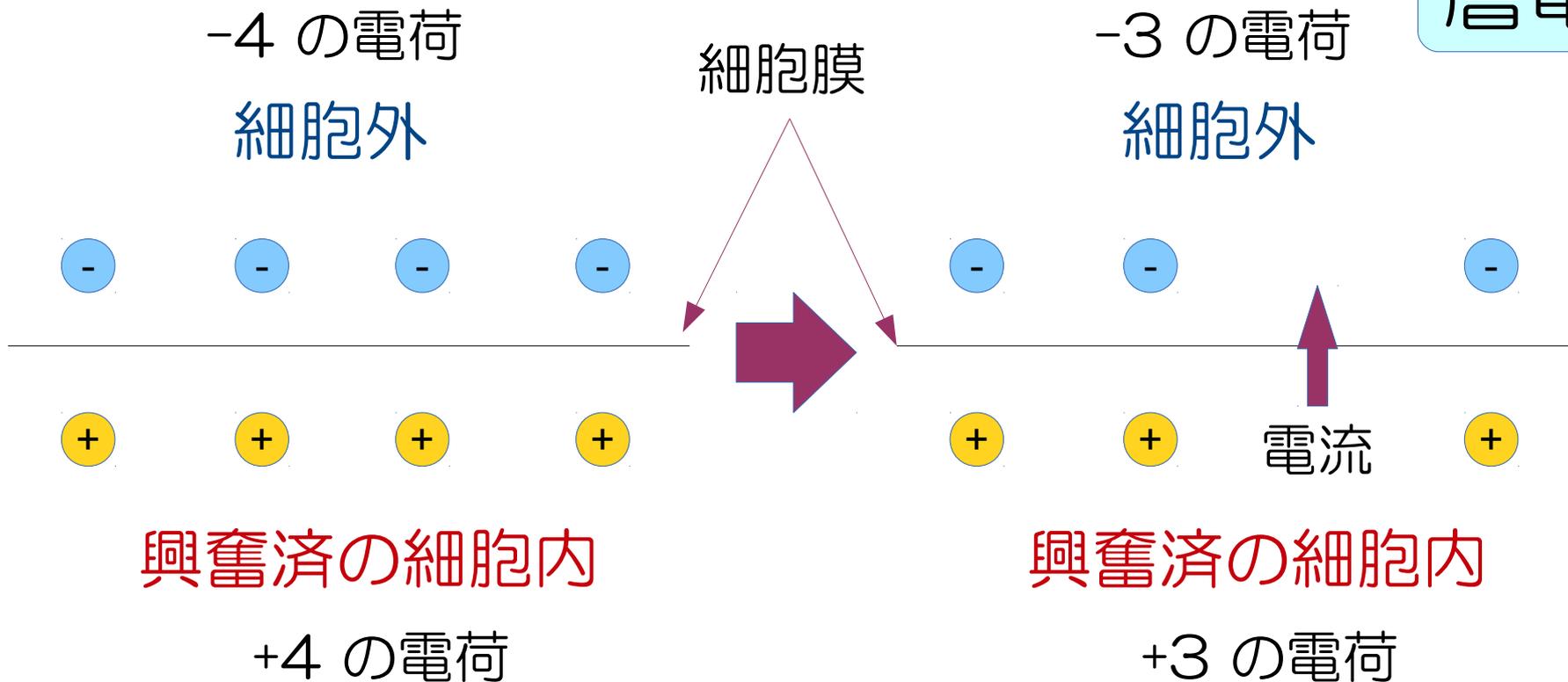
層電対説

# 双極子の正体 (2)

## 細胞膜を透過する電荷の移動

前川孫二郎,  
医学,  
昭和22年  
1月, 2月, 4月.

### 層電対説

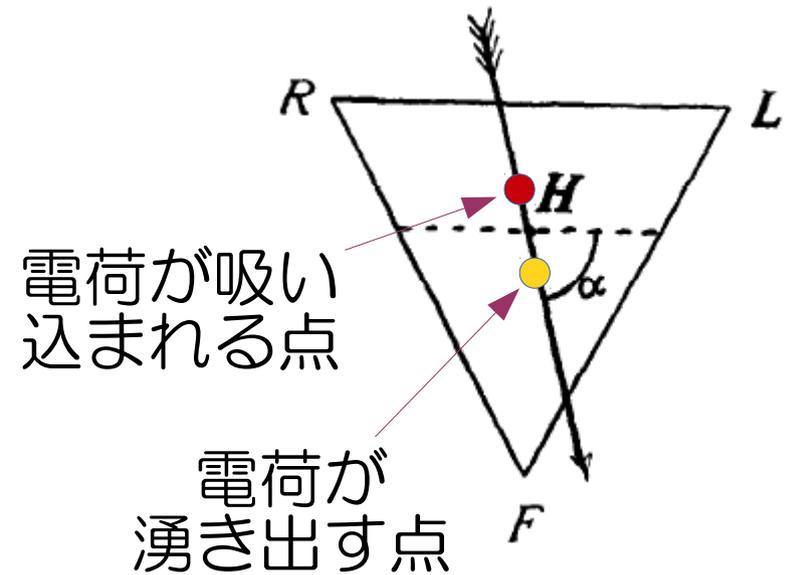
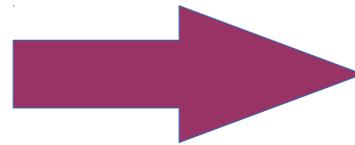


電荷の湧き出しと吸収, とみることができる

# 双極子の正体 (3)

細胞膜を挟んで  
電荷が湧き出す点と  
電荷を吸収する点が  
並んでいる

積分



どう思います？

どうして電流が  
流れるのか？

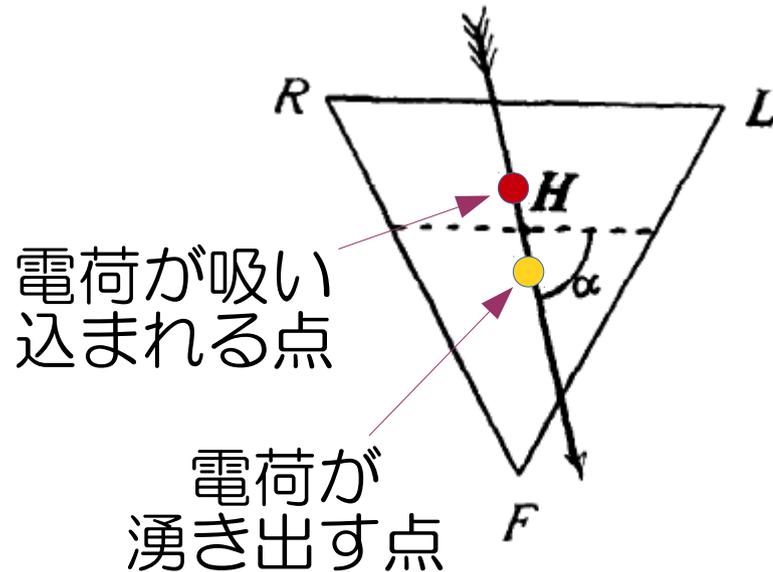
## 歴史のまとめ

- 1887年 心臓の動きと連動して体表を流れる電流を Waller が報告
- 1902年 最初の心電図を Einthoven が報告
- 1913年 Einthoven が正三角形モデルを提唱
- 昭和19年 前川孫次郎の「層電対説」
- 双極子がどうのこうの
- 積分がどうのこうの

結局 よくわからない

# 正三角形モデルの支持根拠

Wilson, F. N., American Heart Journal, **32**, 277-310 (1946).



ヒトの遺体を使った数々の実験

心臓付近に電極を設置して  
心電図を測定する

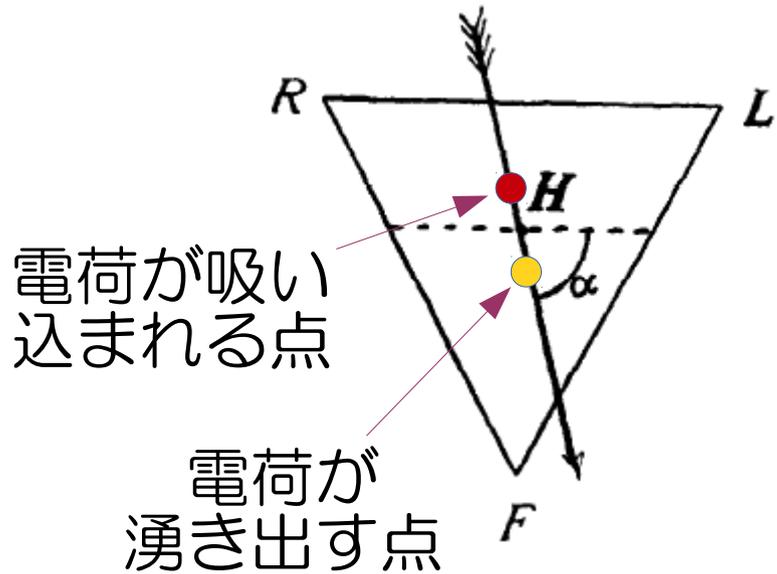


正三角形モデルによる予想と  
ほぼ一致する測定結果

- 第一近似としては十分な精度がある
- 厳密に正しいと考えるのは誤りである
- 実験で確認された範囲においてのみ信頼できる

どう思います？

# 批判



学生A  
「実験的に十分な精度が確認されているのだから臨床的な観点からは正三角形モデルで十分だろう」

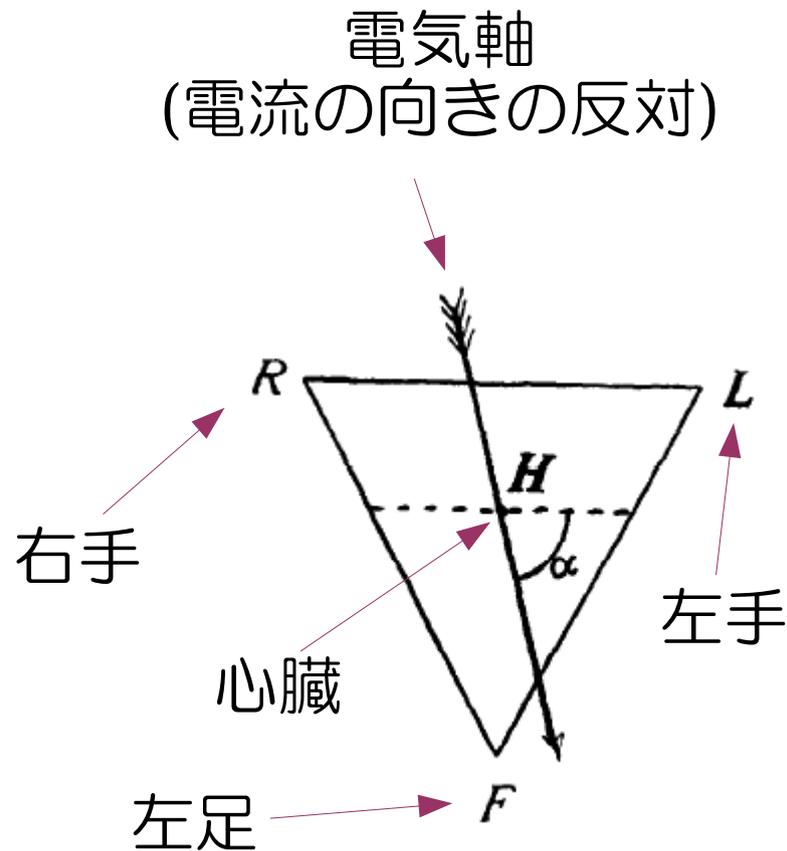
学生B  
「正三角形モデルは解剖学的事実に反しているのだからそんなものと合致する実験結果の方が間違っている！」

学生C  
「そもそも双極子モデルは正しいのだろうか？」

# 正三角形モデルの解析

## 正三角形モデルが成立するための条件

1. 心臓の電流は双極子で説明できる
2. 双極子から各電極までの距離が等しい
3. 電極は双極子を中心とする  
正三角形の頂点に位置する
4. その正三角形は心臓よりも十分大きい

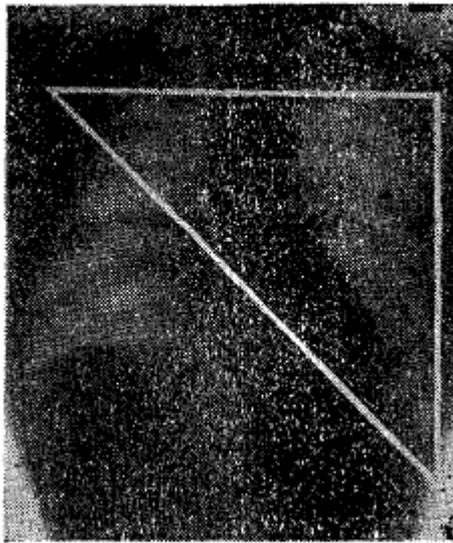


どう思います？

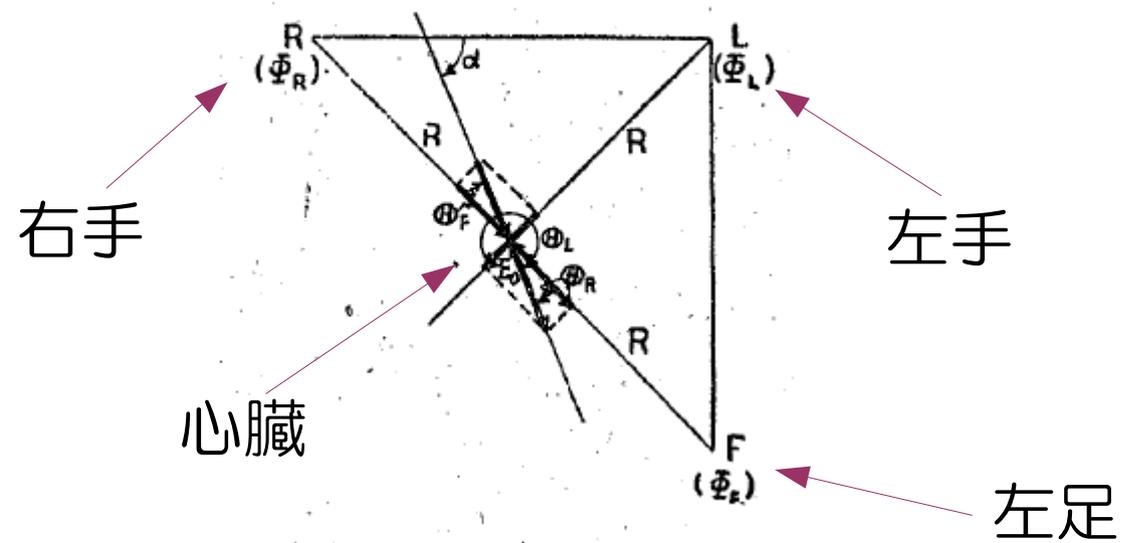
前川孫二郎, 日本循環器病学,  
10, pp.51-53 (1944).

# 直角二等辺三角形モデル

第 3 圖



第 4 圖 直角二等邊三角座標



むしろ直角二等邊三角形である

前川孫二郎, 日本循環器病学,  
10, pp.51-53 (1944).

# 心電図学の現状

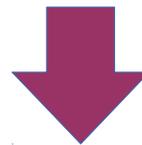
- 心臓の活動は Einthoven の正三角形モデルで説明される
- 電気軸とは 双極子モーメントのことである
- 理論的には疑わしい点もあるが 一応は支持されている
- 結局 よくわからない

よくわかる説明を考えましょう

# 心電図学を研究する意義

学生A

「心電図の詳しい原理はわからなくても  
経験則で診断できるのだから  
臨床的には十分ではないだろうか」



経験則では心電図が持つ情報の  
ごく一部しか抽出できていない

原理の解明により 診断に有用な  
たくさんの情報が得られると期待

Geselowitz, D. B., *The American Journal of Cardiology*,  
14, 301-306 (1964).

- 心電図とは何か
- 心電図学の歴史
- **正常心電図の検討**

# Q1 単一ベクトル近似

Einthoven のモデルでは 心臓の電氣的活動は単一の起電力ベクトルで表現される。これは 電気回路でいえば 心臓を電圧が可変の電池とみなしていることに等しい。また 心電計は電流計(もしくは電圧計)である。

第 I 誘導 (左手と右手の間の誘導) を表す電気回路図を示せ。

ただし 右上肢, 左上肢, 体幹をそれぞれ異なる抵抗で表現せよ。必要があれば 体幹を複数の抵抗で表しても良い。

## Q2 起電力の源

心臓の電氣的活動とは 要するに興奮の伝導である。  
どうして 興奮の伝導が起電力 つまり電池として  
表現できるのだろうか。

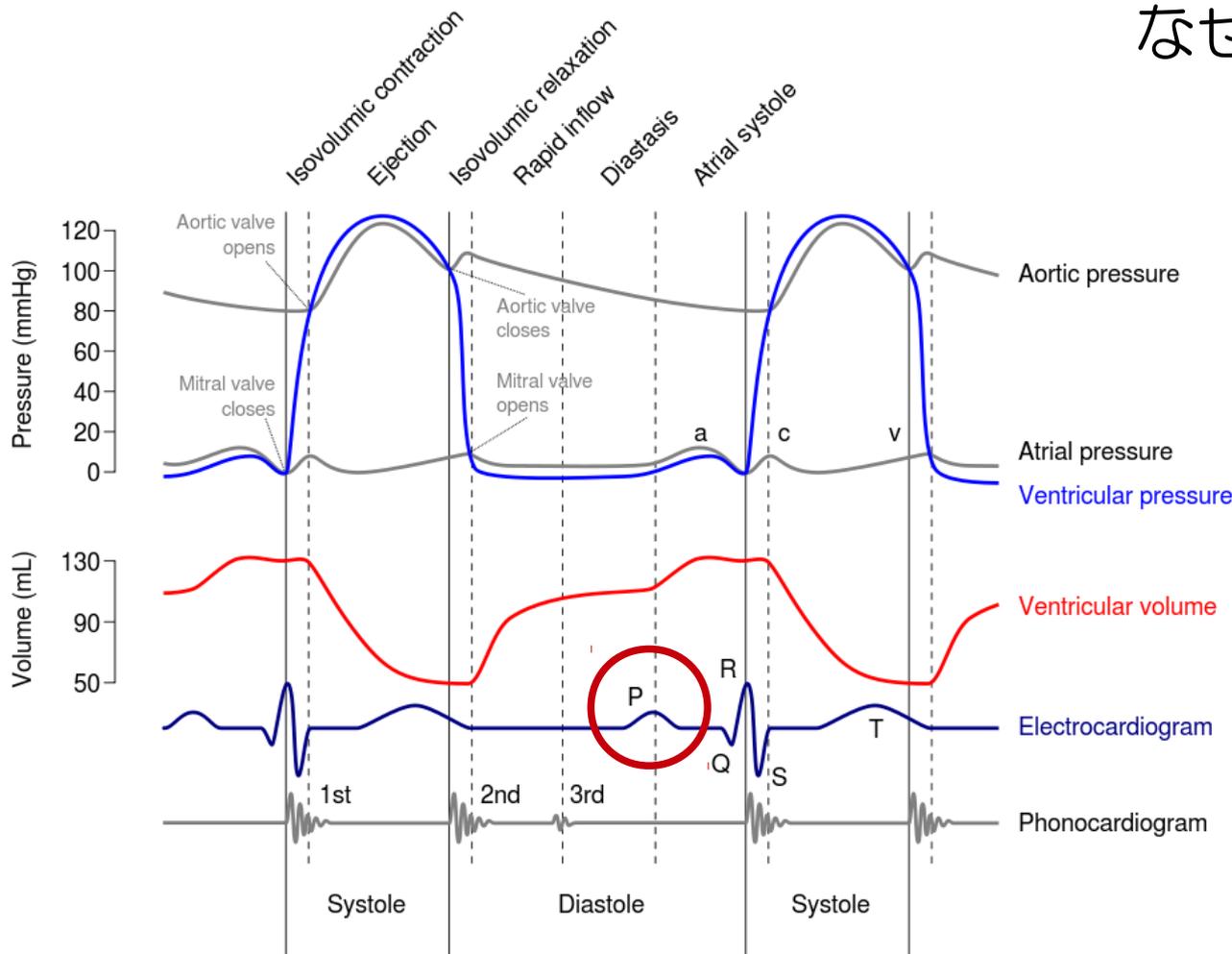
言い換えれば 層電対説において 双極子の積分は どうして  
互いに打ち消しあわずに 大きな起電力となるのだろうか。

最大の山場

コシがわかれば  
正常心電図の八割がわかったといえる

# Q3 P波

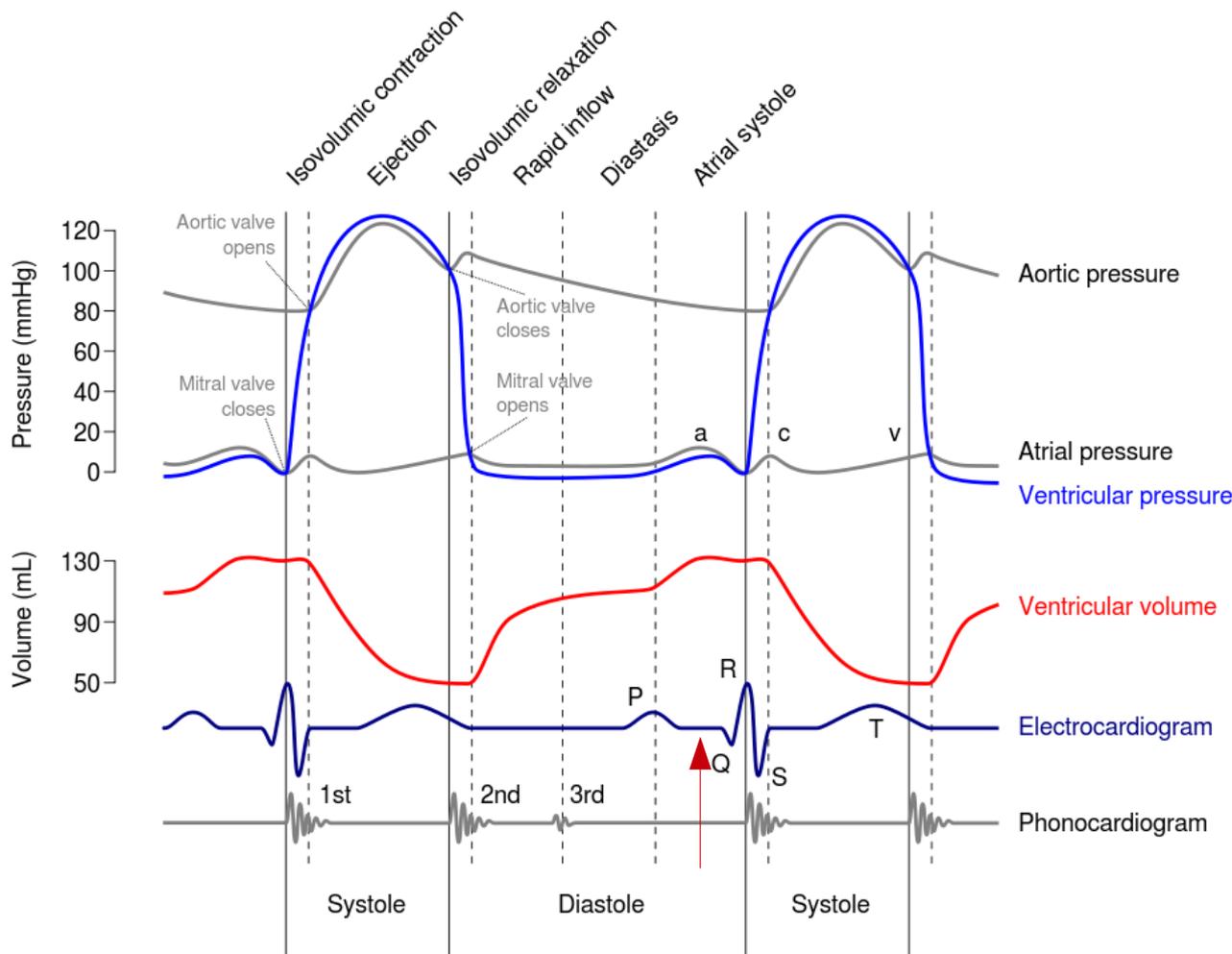
第 I 誘導や第 II 誘導において  
心房が興奮する際に  
陽性の信号が記録されるのは  
なぜだろうか。



# Q4 房室結節と His 束

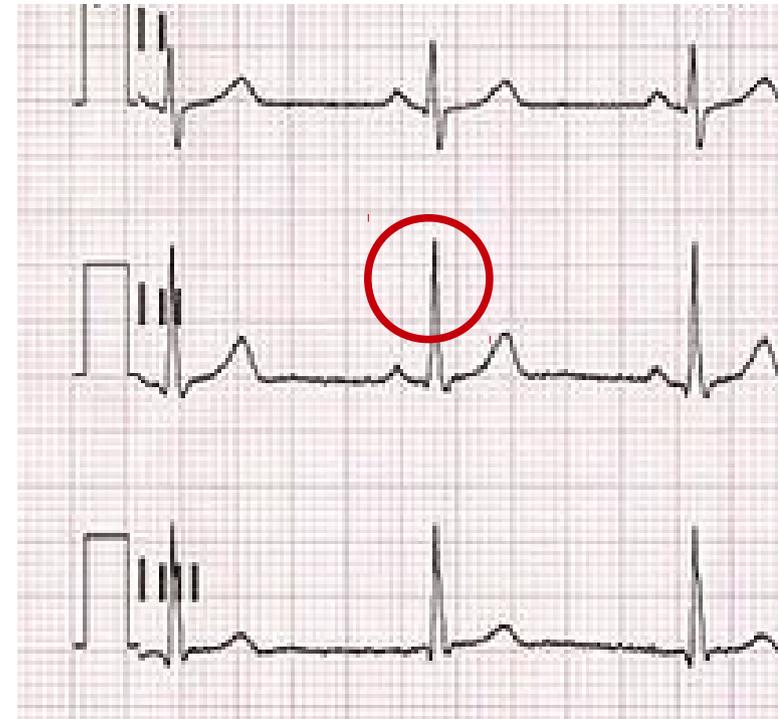
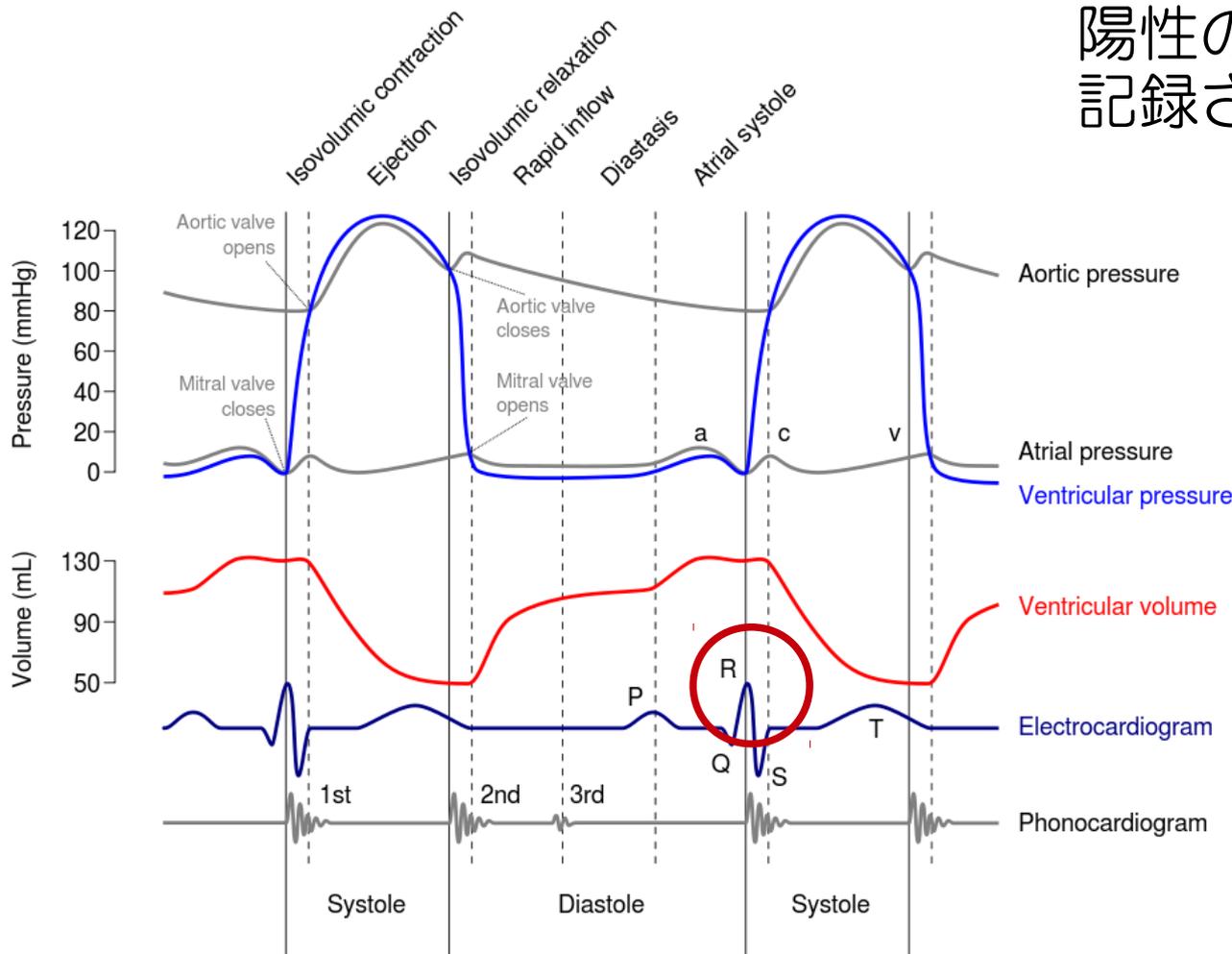
P 波と QRS 群の間には plateau, すなわち信号が平坦な領域があるが、これは房室結節や His 束を興奮が伝導している時間に相当する。

なぜ房室結節や His 束を伝導する間は plateau になるのか。



# Q5 R波

第 I 誘導や第 II 誘導において  
心室が興奮する際に  
陽性の信号 (R 波) が  
記録されるのはなぜだろうか。



## Q6 q 波



第 II 誘導において R 波の前に小さな陰性の波がみられることがあります。これは q 波と呼ばれる。

これは Purkinje 繊維の左脚の方が右脚よりも少し早く興奮するために生じるという。

なぜ左脚の方が早く興奮すると陰性の波がみられるのか。

# Q7 s 波



第 II 誘導において  
R 波の後に小さな陰性の  
波がみられることがあり  
これは s 波と呼ばれる。

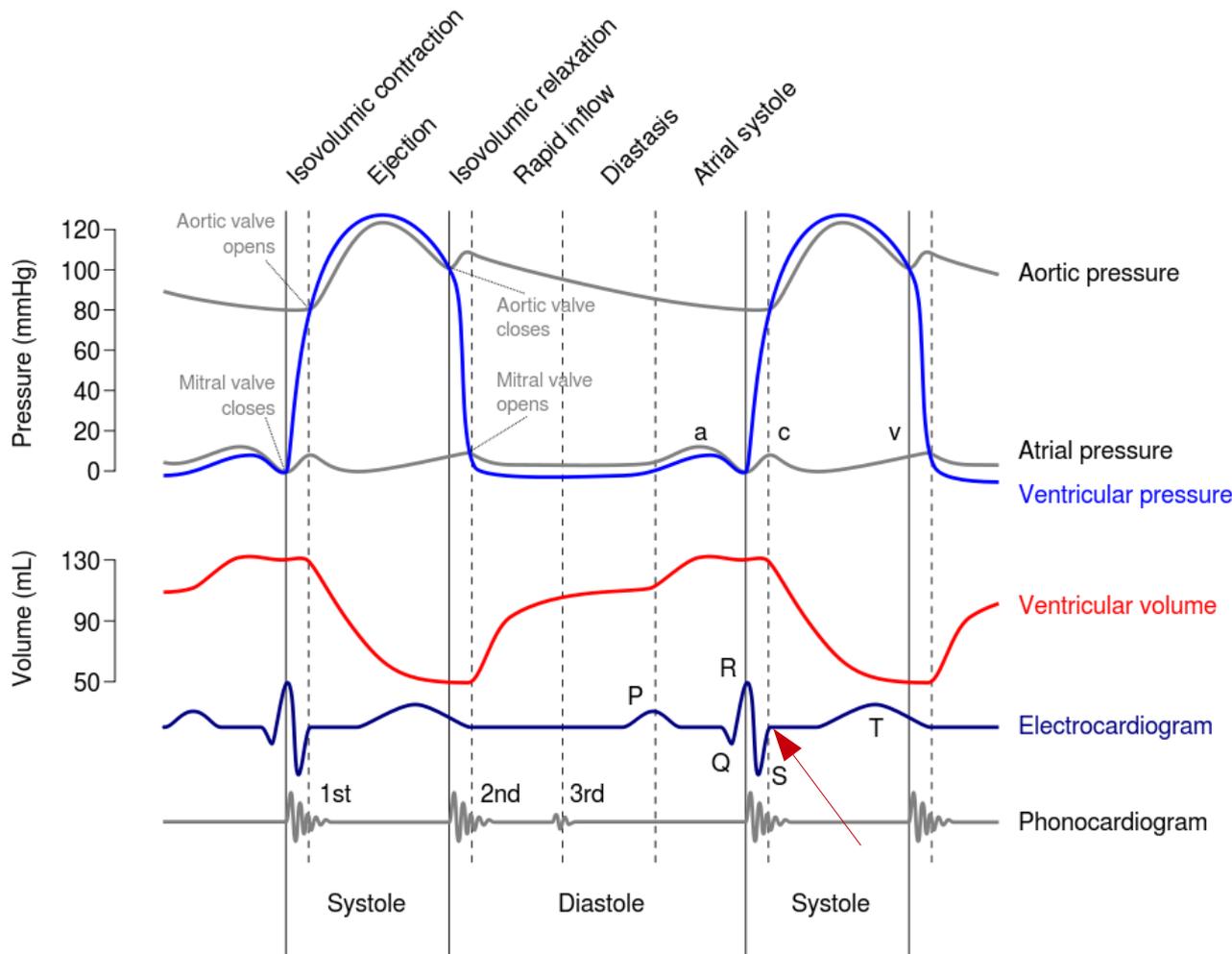
これは左心室の全域が  
既に興奮しており  
右心室だけを興奮が伝導  
している状態だという。

このときなぜ  
陰性の波がみられるのか。

Q8 J点

QRS群の後に信号が0になる点がありこれを“ST junction”またはJ点という。

どうして電極間の電位差がなくなるのだろうか。

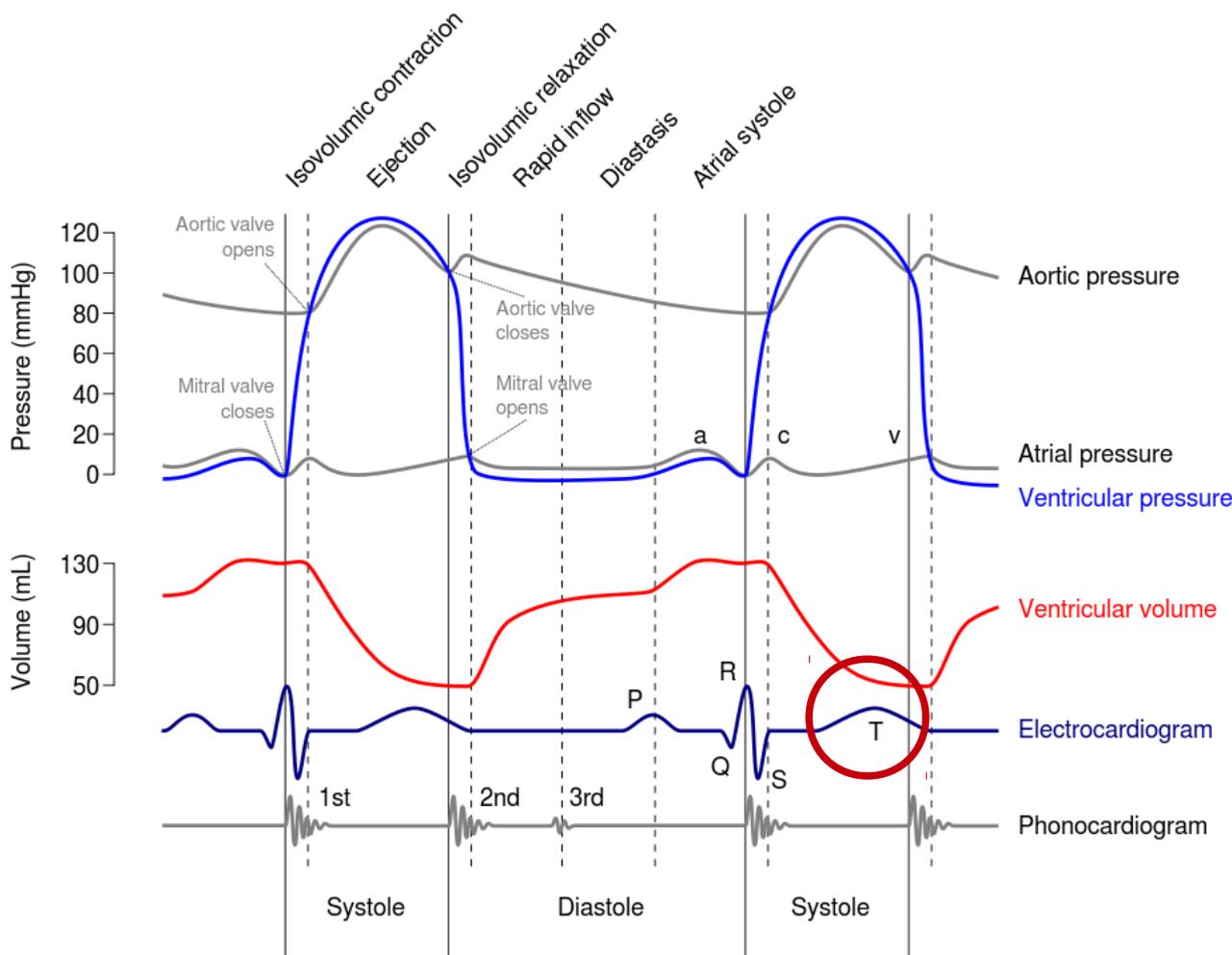


# Q9 T波

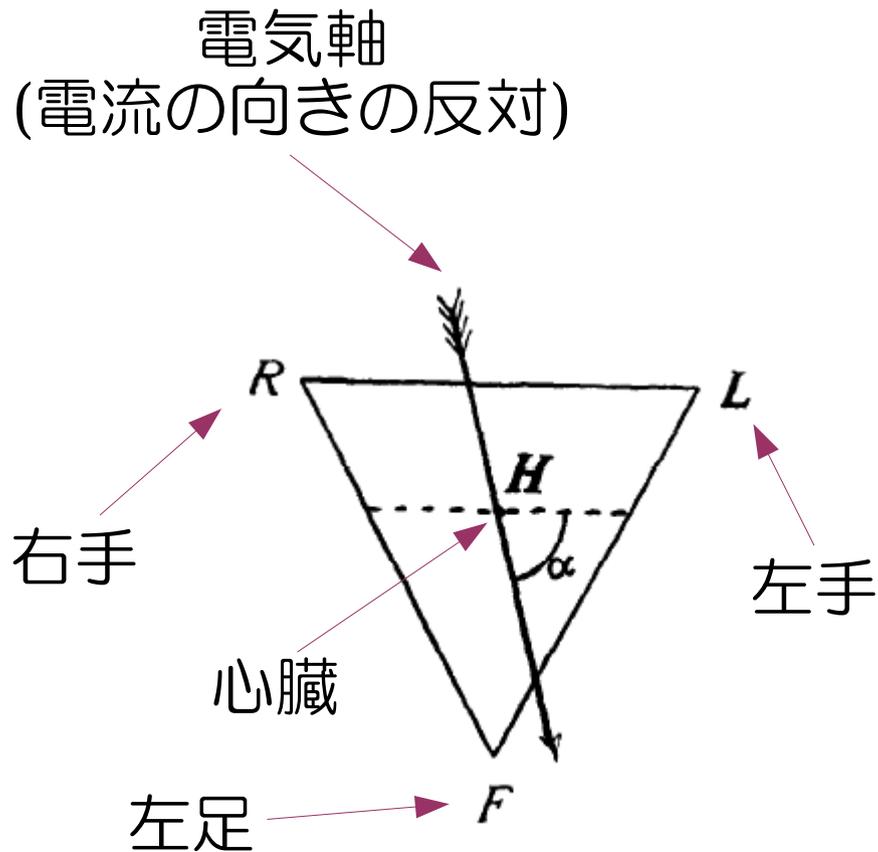
心室が再分極する際には陽性の信号がみられこれはT波と呼ばれる。

陽性なのは Purkinje 繊維が固有心筋よりも遅れて再分極するためであるとされる。

なぜ Purkinje 繊維が遅れて再分極すれば陽性の信号が生じるのか。



## Q10 aVR



aVRとは「『左上肢の電位と左下肢の電位の平均』を基準とした右上肢の電位」のことである。  
すなわち

$$aVR = \text{右上肢} - (\text{左上肢} + \text{左下肢}) / 2$$

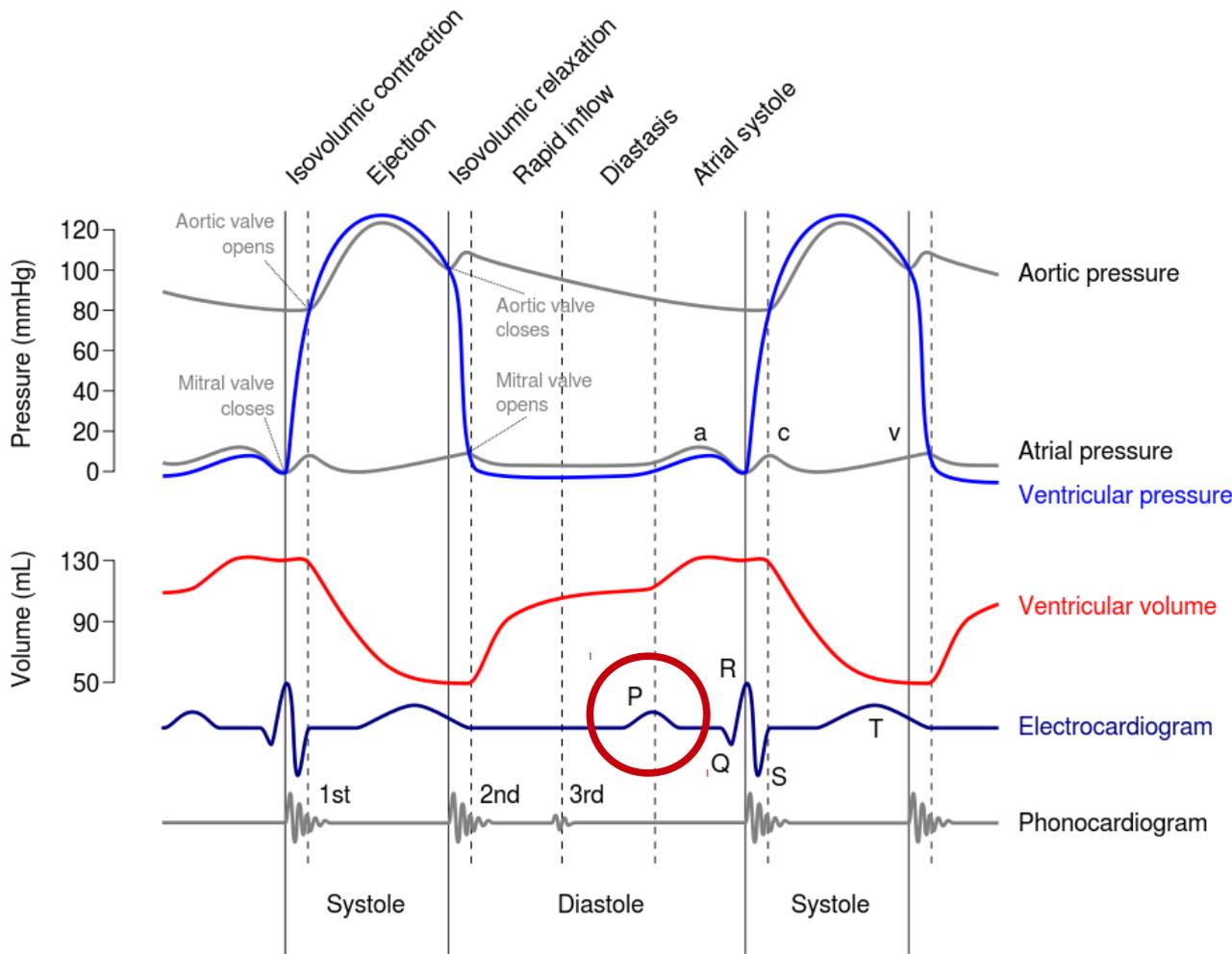
である。  
これは一体何を  
みようとしているのだろうか。

Wilson, F. N.,  
American Heart Journal,  
**9**, 447-458 (1933).

Goldberger, E.,  
American Heart Journal,  
**23**, 483-492 (1942).

# Q11 単極肢誘導

aVR, aVL, aVF において  
P 波はそれぞれ  
陽性だろうか  
それとも陰性だろうか。

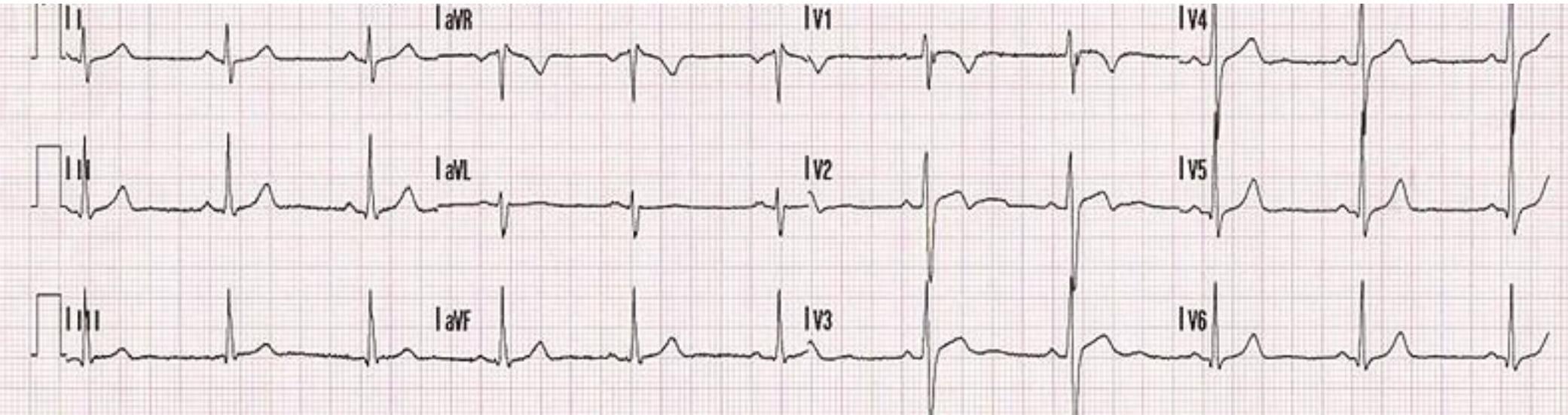
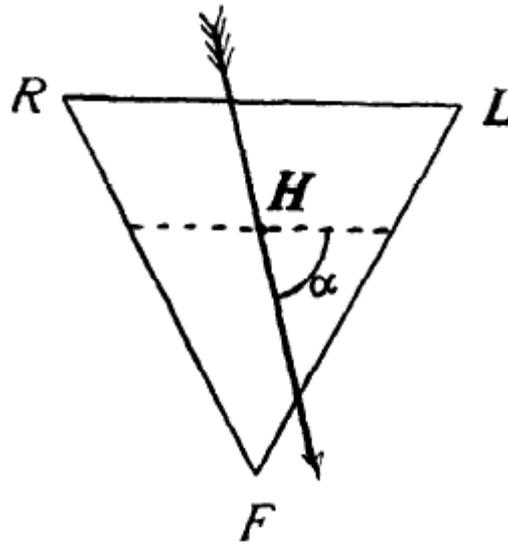


$$aVR = \text{右上肢} - (\text{左上肢} + \text{左下肢}) / 2$$

$$aVL = \text{左上肢} - (\text{右上肢} + \text{左下肢}) / 2$$

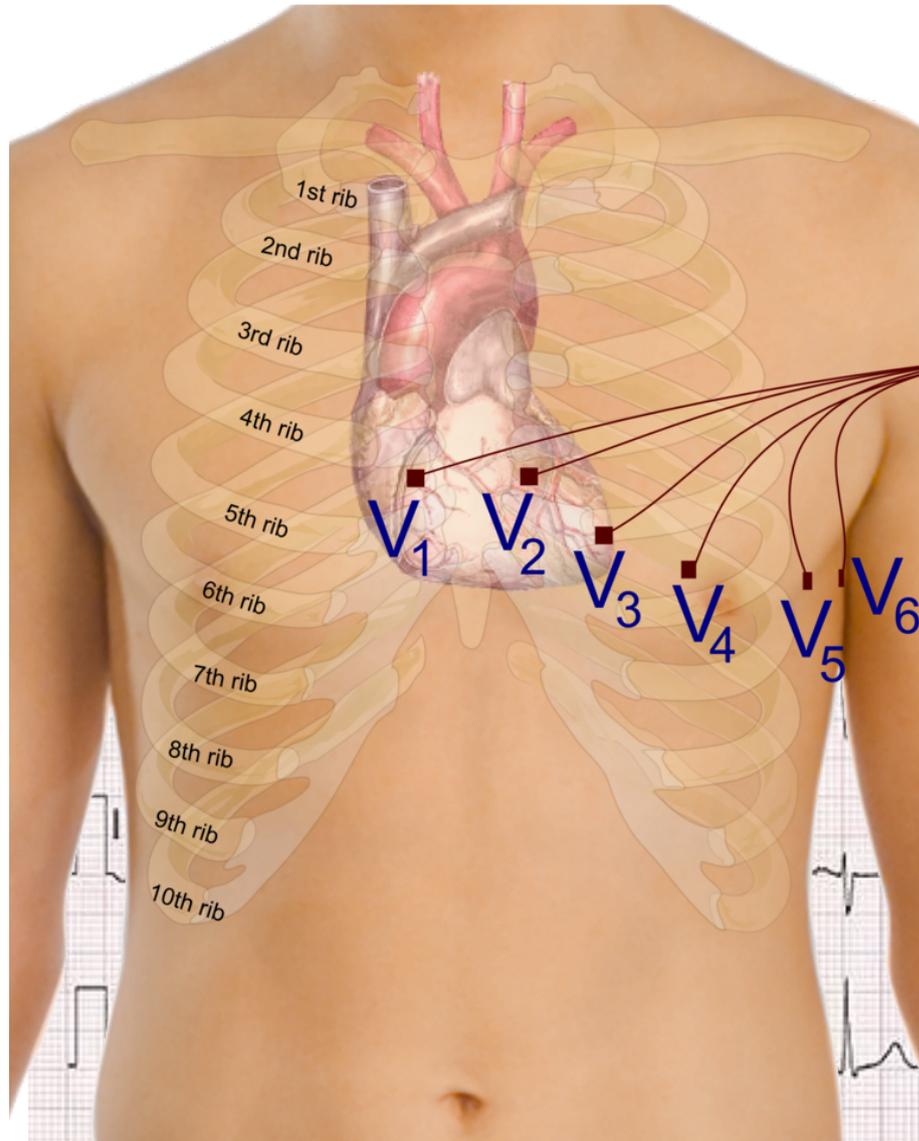
$$aVF = \text{左下肢} - (\text{右上肢} + \text{左上肢}) / 2$$

# Q11 単極肢誘導 (解答)



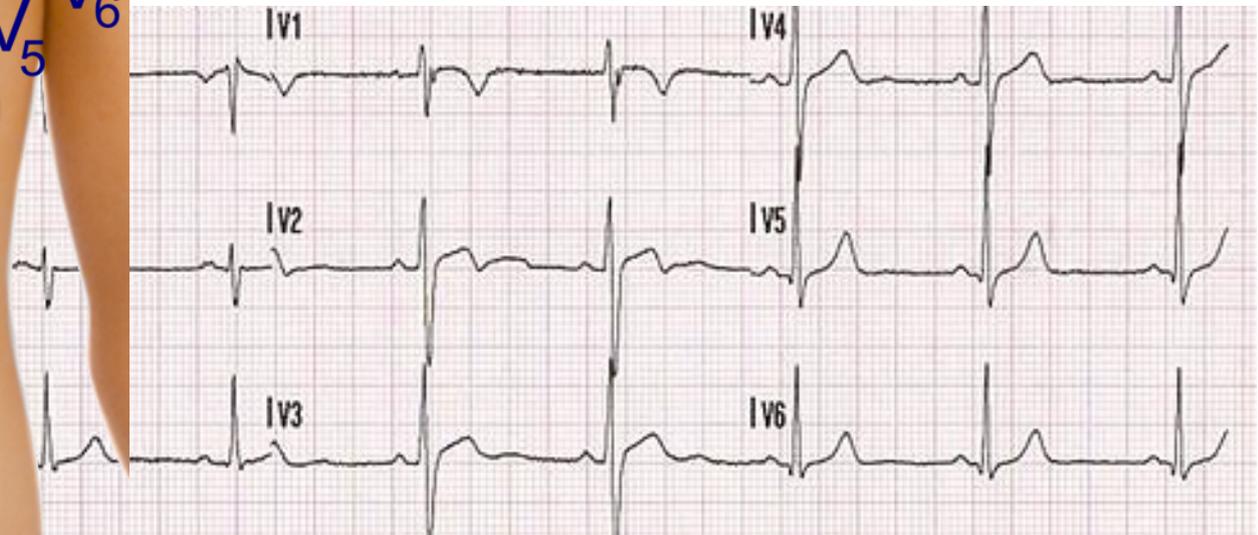
## Q12 胸部単極誘導

Wikipedia (英語版) より

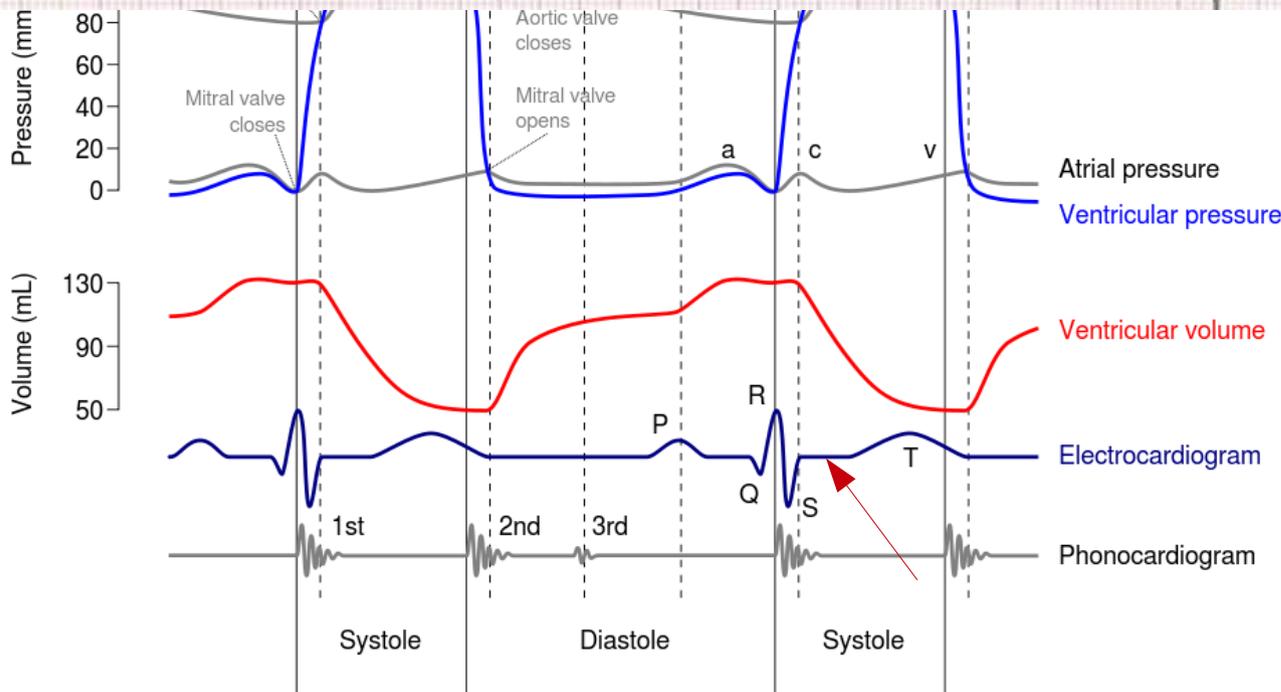
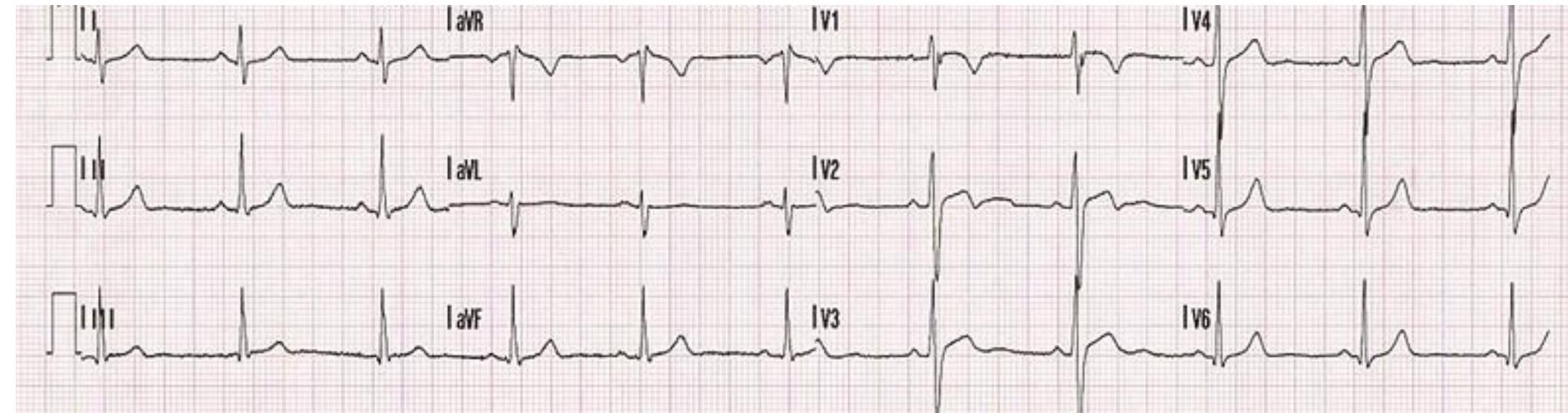


$V_1$  と  $V_6$  では  
QRS 群の形が大きく異なる。  
それはなぜか。

なお  $V_1$  から  $V_6$  は  
左右の上肢および左下肢の  
電位の平均を基準とした  
各電極の電位である。



# Q13 ST segment



S波とT波の間はST segmentと呼ばれ、ほぼ基線に一致しているとされている教科書もある。

しかし実際にはST segmentは緩やかな勾配を持ちT波との境界は曖昧である。なぜか。

# まとめ

- 心電図は 電位差ではなく電流で考えた方がわかりやすい
- 心電図理論は 未だ確立されていない
- 我々は心電図が持つ情報のごく一部しか使っていない
- **これからの心電図学を開拓するのは我々の使命である**



Wikipedia より

# 著作権について

本文書の著作権は、引用されている画像等を除き、名古屋大学医学部医学科平成24年編入学の川口真一が有する。

本文書は、科学的良心に基づいてなされる限りにおいて、自由に複製、改変、ならびに再配布することができる。ただし引用されている画像等についてはこの限りではなく、著作権に適切に配慮されよ。

この文書の一次配布元は <http://francesco.jp/> である。質問や問い合わせは [ecg@francesco.jp](mailto:ecg@francesco.jp) まで。

2013年8月15日