

〔総説〕

心電図と細胞内活動電位及び細胞外活動電位との関係

猪股孝四郎

北海道医療大学歯学部

Relationship between electrocardiogram and intracellular action potential or extracellular action potential

Koshiro INOMATA*

*Professor emeritus (Health Sciences University of Hokkaido)

Abstract

An analysis of the relation between electrocardiogram (ECG) and intracellular action potential in heart cells was performed using two considerations, that is, with the extracellular action potential induced from the differentiated intracellular action potential (Inomata et al (2005)), and the size of the extracellular action potential dependent upon the number of synchronized cells. The following results were obtained :

- (1) The extracellular action potential from Ventricular muscles was larger than such potentials from other parts, and this potential from the Atrial muscles was secondary (1/5~1/10 potential from Ventricular muscles), but this potential from other parts (Atrioventricular node, Common bundle, Purkinje fibers etc.) was small, so this small potential disappeared from the record of ECG, then these two extracellular action potentials (Ventricular and Atrial muscles) were applied for an analysis of the ECG.
- (2) Similar patterns for the P wave and QRS complex in ECG was found in the course of the differentiated intracellular action potential in Atrial and Ventricular muscles (Fig.4, A'+V').
- (3) The peak of the T wave usually showed positive (same direction for R wave), but sometimes it showed negative (Goldman, M.J. [Intermediate Heart Position]), the cause for this discrepancy was as follows : a) the relationship between electrode and heart position in the thorax. b) the existence of afterhyper-polarization (intracellular action potential) on Ventricular muscle fibres or absence of this afterhyper-polarization. c) the electrical effects of muscle fibres in the Vortex of the Heart.
- (4) Sometimes the U wave disappeared in ECG, so that, more investigation for this wave is necessary for an analysis of this wave.

Key words : Intracellular action potential, Differentiated intracellular action potential, Extracellular action potential, Electrocardiogram (ECG), Synchronized cells.

緒 言

心臓の細胞内活動電位（以下、細胞内電位と略す）と心電図（Electrocardiogram以下ECGと略す）との関連については、あまり報告されていない。この関係をより明

にするために、今迄に報告された論文を参考にして、考察を試みた。

まず、細胞内電位の導出については、Hecht (1957) が報告し、同時に彼はECGのQRS群とT波との関係についても報告している。しかしP波については記述がな

受付：平成19年10月31日

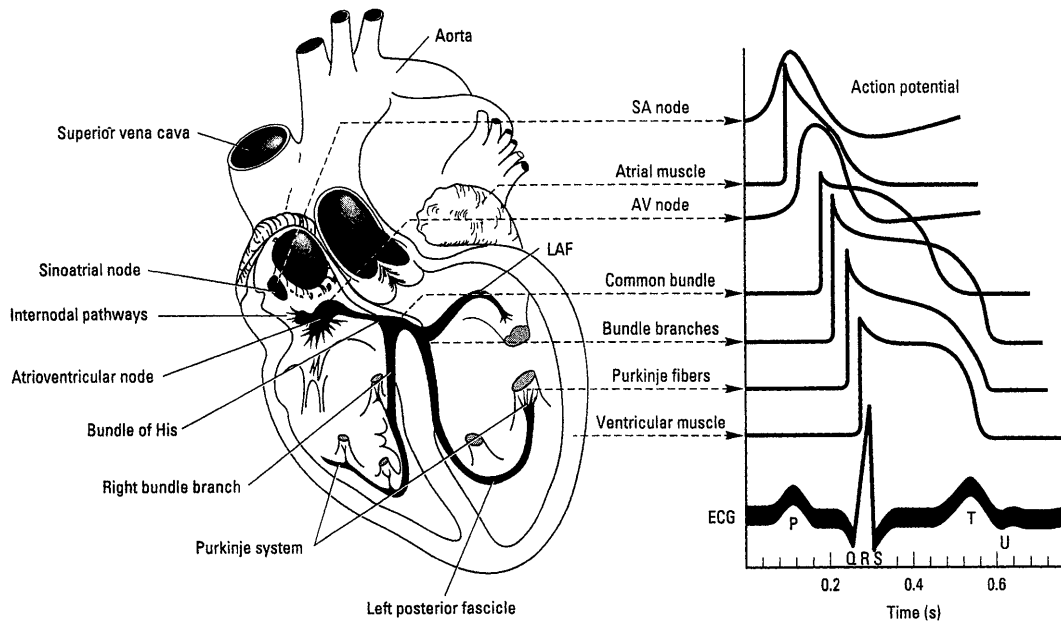


図1 ECGと心臓の各部位より導出した細胞内電位。
Ganong, W.F. Review of medical physiology 16th edition (p495) より。

い。またGanong (1993) は心臓の解剖図譜と心臓の各部位から導出した細胞内電位の変動経過を併示し、さらにECGを示している。しかし細胞内電位とECGの関係については記載がない。一方、猪股ら (2005) は海産軟体動物 (アメフラシ (Aplysia)) の単一細胞について、神経の活動時にみられる細胞内電位と細胞外活動電位 (以下、細胞外電位と略す) の同時記録を行ない、この両者の関係を検討し、その結果、細胞内電位の変動経過の微分波形は細胞外電位の変動経過を示していると結論している。また、多数の細胞が同期して活動すれば、このときに起こる細胞外電位は同期して活動する細胞の数に応じた強い電位が得られるのは当然である。この様な考えを基にして心臓の細胞内電位とECGの関係の解析を試みた。

方 法

Ganong (1993) は心臓の解剖図譜と各部位から導出した細胞内電位とECGの3つを同じ図に示している、これを図1に示す。この図の特徴は細胞内電位とECGを同じ時間軸をもちいて表わしている。しかし、この図から各部位の細胞内電位とECGの各波との関係を理解することは難しい。この各部の細胞内電位とECGの関係を理解するために、まず心臓各部位の細胞外電位の大きさを知る必要がある。そのためには、心臓各部の同期して作動する細胞数を知る必要がある。それには、手もとにある心臓の解剖図譜 (Bell et al., 1972; 杉ら, 1985; 平沢, 岡本, 1974; Kahle et al., 1982; 真島, 1986) を参考にして各部位の細胞数を推計した、この数と猪股ら

(2005) の報告の細胞内電位と細胞外電位の関係を併せて勘案した。この結果、心室の細胞 (筋線維) 数を基準とすれば、心房の細胞 (筋線維) 数は心室細胞の $1/5 \sim 1/10$ (以後、これを約 $1/7$ とする) とみなすことが出来る。即ち、このことから、心室で発生する細胞外電位を1とすれば、心房に発生する細胞外電位は約 $1/7$ の電位となる。同様にして他の部位 (Atrioventricular node, Bundle of His, Purkinje system 等) では心房の細胞数よりも、さらに少ないので、これらの部位で発生す

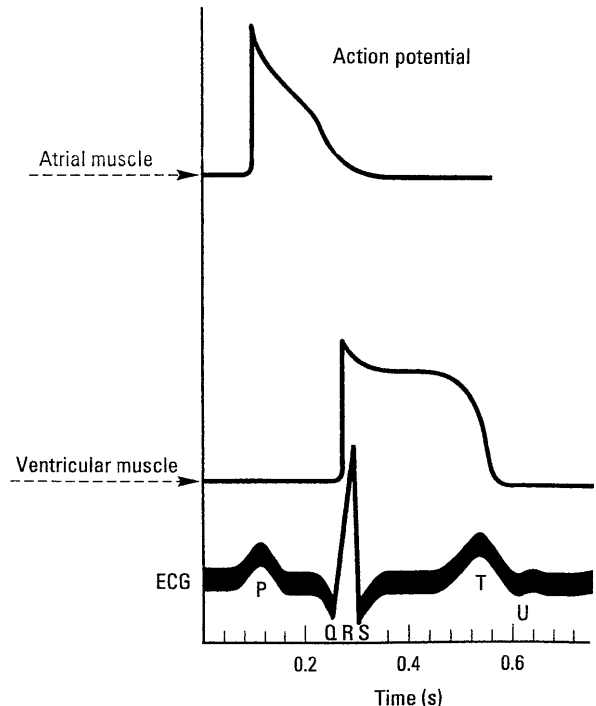


図2 ECGの解析にもちいられる細胞内電位。
細胞外電位の大きさを考慮するとこの2つの細胞内電位でよいことになる。

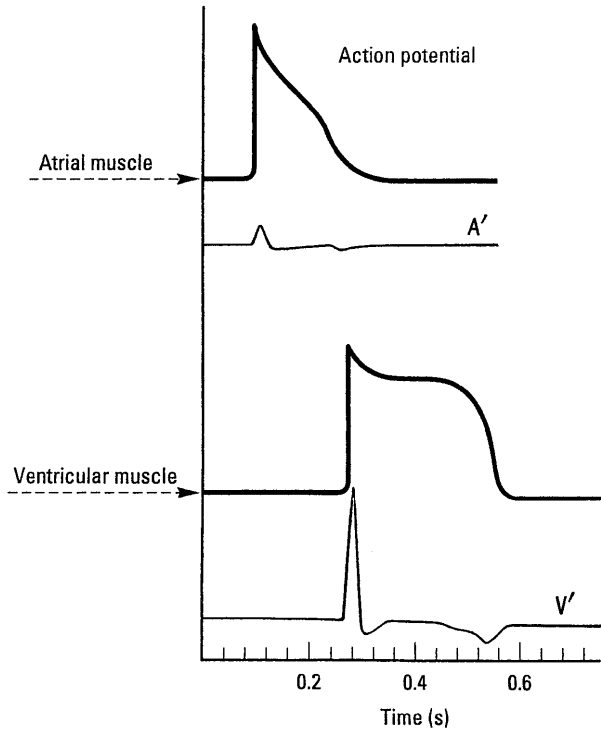


図3 図2の細胞内電位とそれぞれの部位で同期して作動する細胞の数を勘案したときの微分波形。
 A'曲線：Atrial muscleの細胞内電位とその筋線維の数を勘案して描いた微分波形（心房の細胞外電位に相当）。
 V'曲線：Ventricular muscleの細胞内電位とその筋線維の数を勘案して描いた微分波形（心室の細胞外電位に相当）

る電位は、心房で発生する電位よりもさらに微弱な電位となり、この微弱な電位は普通に用いる心電計では記録出来ないほど小さいと考えられる。これらのことからECGと比較検討するには、心房筋（Atrial muscle）と心室（Ventricular muscle）の細胞内電位から発生する細胞外電位と比較すれば良いことになる。この関係を図2に示す。

結 果

前述のごとく、ECGと心室及び心房の細胞内電位とを比較検討するには、この両方の細胞内電位の微分波形が必要となる。しかし、図1、2に示してある細胞内電位の波形は必ずしも生体の細胞から導出した波形でなく、多少図式化した部分もあるので（細胞内電位が変化するとき、活動の始から頂点に至るまでの電位変化が直線状を示すことは生物体の細胞ではみられない現象である）、Hecht（1957）の報告を参考にして、細胞内電位の微分波形を描いた。また前述のごとく心室の筋線維の数を基準とし、このときの細胞外電位を基本とし比較すれば、心房の細胞外電位はその約1/7となる（但し、心房、心室のそれぞれの細胞内電位は図1、2が示すごとく、ほぼ同じ電位である）。これらのことを基にして描いたのが図3である。この図の曲線A'及びV'は心房、

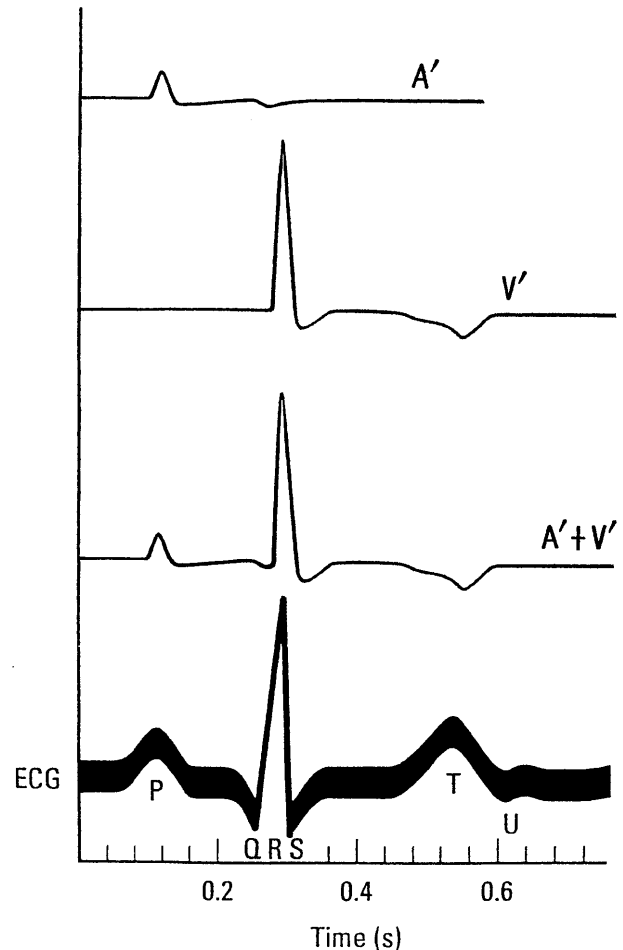


図4 図3の2つの微分波形（A'曲線とV'曲線）をA'+V'曲線としてまとめ、これとECGを比較した。

心室の細胞内電位の微分波形であって、各々の細胞外電位の大きさに相当する波形である。これ等をECGと比較するためには、ECGの記録と同じ時間軸を用いて示さなければならぬし、またこのA'及びV'を加算して示さなければならぬ。この曲線をA'+V'曲線とし、ECG曲線と比較して示したのが図4である。この図によってECGと心房と心室の細胞内電位の微分波、即ち心房と心室の細胞外電位とECGの比較が可能となった。また、この図によりA'+V'曲線にはECGのP波及びQRS群相当する波形がみられるが、T波に相当する波は逆転波形（陰性T波）を示しU波に相当する波形は見当たらない。

考 察

猪股ら（2005）はアメフラシ（海産軟体動物）の腹部神経節内で自発放電を繰り返す神経細胞をもちいて、細胞内電位の変動経過と細胞外電位の変動経過を同時記録し、これを比較検討した。その結果、細胞内電位の微分波形が細胞外電位の波形と一致すると報告している。但し、猪股ら（2005）の報告では細胞内の微分波形よりも

細胞外電位の波形の方が約0.3ms遅れて現われると報告している。しかし普通のECG記録では、0.3msを表現することは困難である。したがってこの遅れについては今回はふれなくて、細胞内電位の微分波形と細胞外電位（又はECG）とは遅れがないものとして考察する。

ECGと細胞外電位の微分波形の関係については図4が示しているが、この図からも明らかのように、ECGのP波及びQRS群は細胞内電位の微分波形（A'+V'曲線）上に表われているので、心房及び心室の細胞外電位がECGのP波及びQRS群の源であることは明らかである。

しかしT波及びU波については問題が残る。図1の被検動物の種類についてはGanong (1993)は何の説明もない。そこで著者は次のように推定した。この図1にあるECGは、おそらく正常なヒトの標準肢導出から得られた記録と推定した。しかし、心臓各部から導出された細胞内電位はヒトからの導出でないことは確であり、おそらくは、カエル等の心臓から導出した細胞内電位であろうと推定した。要するにヒトのT波とU波が図4のA'+V'曲線に見られないのは、異種動物（カエル等）とヒトのECGとを比較したために起きた現象なのかも知れない。

また、ヒトのECGのT波及びU波について、今迄に報告された正常なECGにもT波が逆転し陰性を示している場合もあるし、U波がまったく見出すことが出来ない記録も多くみられる。これらのことを勘案すると、T波とU波を別々に検討する必要もあると考えた。

まずT波について検討すれば、Goldman (1964)はヒトのECGについては、心臓の位置がIntermediate Hart Positionの第Ⅲ導出には陰性T波の出現を明記している。このことは導出電極と心臓の位置関係で起こる現象であることを示唆している。また正常な犬や猫について（ヒトの標準肢導出に相当する記録）みると、中村ら (1997)は犬の第Ⅰ導出ではT波は陰性を示している。また前出ら (2004)の猫については第Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ導出のいずれもT波は陰性を示している。しかし、この犬、猫についての他の多くの報告では陽性を示すT波の記述がある。要するに、これらの現象は上述の心臓の位置と導出電極との関係によっても陰性T波が記録される可能性があることを示唆している。

一方、Hecht (1957)の報告のように、カエルの心室筋が活動するとき、その活動が終了する時期に細胞内電位に過分極電位がみられる場合には、このような細胞内電位の微分波形には陽性T波のような経過を示すのは当然である。このような一時的な過分極電位を示す細胞が多く存在する場合には陽性T波は当然出現する。

次に、ヒトの心臓の解剖譜図によれば、心尖部の心筋の走行は渦状を呈している。これがT波の波形に影響を及ぼしている可能性は十分にあると考えられる。しかしこの渦状の程度とECGの波形については不明のことが多い。

U波については、Hecht (1957)が示すように、心室の心筋の細胞内電位の回復時に過分極が見られ、さらに心筋細胞が長いので時間的な差が生じた場合にはU波の出現となるのは当然である。また心尖部の筋線維（細胞）の渦状走行がU波の出現に大きく影響しているのかも知れない。いずれにしてもECGにU波の出現が明確でない理由を含めて、今後のこのU波の解明に期待したい。

結 語

ECGと心臓の細胞内電位との関係を理解するのに2つの考えをもとに行なった。1つは猪股ら (2005)が報告しているように、細胞内電位の微分波形は細胞外電位と同じ形を示している。次は、細胞外電位の大きさは同期する細胞の数に依存しているとする、この2つの考えである。これにより下記のような結論を得た。

1. 心室筋群に発生する細胞外電位は心臓の他の部位にみられる細胞外電位より大きい、また心房筋群ではこの細胞外電位は心室筋群に次で大きい（心室筋群の電位の約1/7位である）。しかしその他の部位（Atrio-ventricular node, Bundle of His, Purkinje fibers 等）におけるこの電位はさらに小さく、この小さな電位は普通のECGの記録紙には記録されない。それでECGと比較検討する対照の電位は心室筋群と心房筋群の細胞外電位の2つの電位で良いことになる。
2. ECGにみられるP波やQRS群と類似している波は、心房と心室筋群の細胞内電位の微分波形（細胞外電位）上の経過にもみられる（図4, A'+V'曲線）。
3. ECGのT波は一般には陽性（P波と同側）を示すが、時には陰性も示す（Goldman, 1964）、この矛盾は次のような理由によって起ると考える、a) 導出電極と心臓の位置との関係の差異、b) 心室筋線維に於て後過分極電位が在存するかどうか、c) 心臓の渦部に於ける筋線維の走行が及ぼす電気的効果等による単独、又は筋線維間の相互的作用の結果みられる現象と考えることも出来る。
4. ECGにはU波は時に記録されないことがある。その理由や、その他、U波の特徴についてさらなる研索を行なわないと、U波の発生の解明は出来ない。

謝 辞

稿を終るにあたり、内科学講座家子正裕教授の御指導に心より感謝を申し上げます。

文 献

- Bell GH, Davidson JN, Emslie-Smith D. Text book of physiology and biochemistry (eighth edition) Churchill Livingstone, Edinburgh and London ; P461, 1972.
- Ganong WF. Review of medical physiology (16th edition) (a LANGE medical book) Appleton & Lange, Norwalk, Connecticut, copyright : p495, 1993.
- Goldman MJ. Principles of clinical electrocardiography (5th edition) Maruzen Asiain Edition ; p49, 1964.
- Hecht HH. Normal and abnormal transmembrane potential of the spontaneously beating heart. Ann New York Academy of Sciences 65 ; p700-733, 1957.
- 平沢 興, 岡本道雄. 脈管学・神経系. 解剖学2, 改訂10版増刷5回, 東京, 京都, 金原出版. P5-17, 1974.
- 猪股孝四郎, 太田 勲, 倉橋昌司. 細胞外電位と細胞内電位の微分波形との関係. 北医療大歯誌, 24 : 139-142, 2005.
- Kahle W, Leonhardt H, platzner W, (越知淳三) : 解剖学アトラス (Taschenatlas der Anatomie). 東京本郷 ; 文光堂. 24 : 139-142, 2005.
- 前出吉光 (監修). 猫の臨床 (主要症状を基礎とした), デリーマン社. p46-47, 2004.
- 真島英信. 生理学. 改訂18版, 東京本郷, 文光堂. P355, 1986.
- 中村良一 (代表). 新編獣医ハンドブック, 養賢堂. p913, 1997.
- 杉 晴夫 (代表). 人体機能生理学-循環 (林 秀生) -, 初版, 東京, 京都 ; 南江堂 : P397-402, 1985.