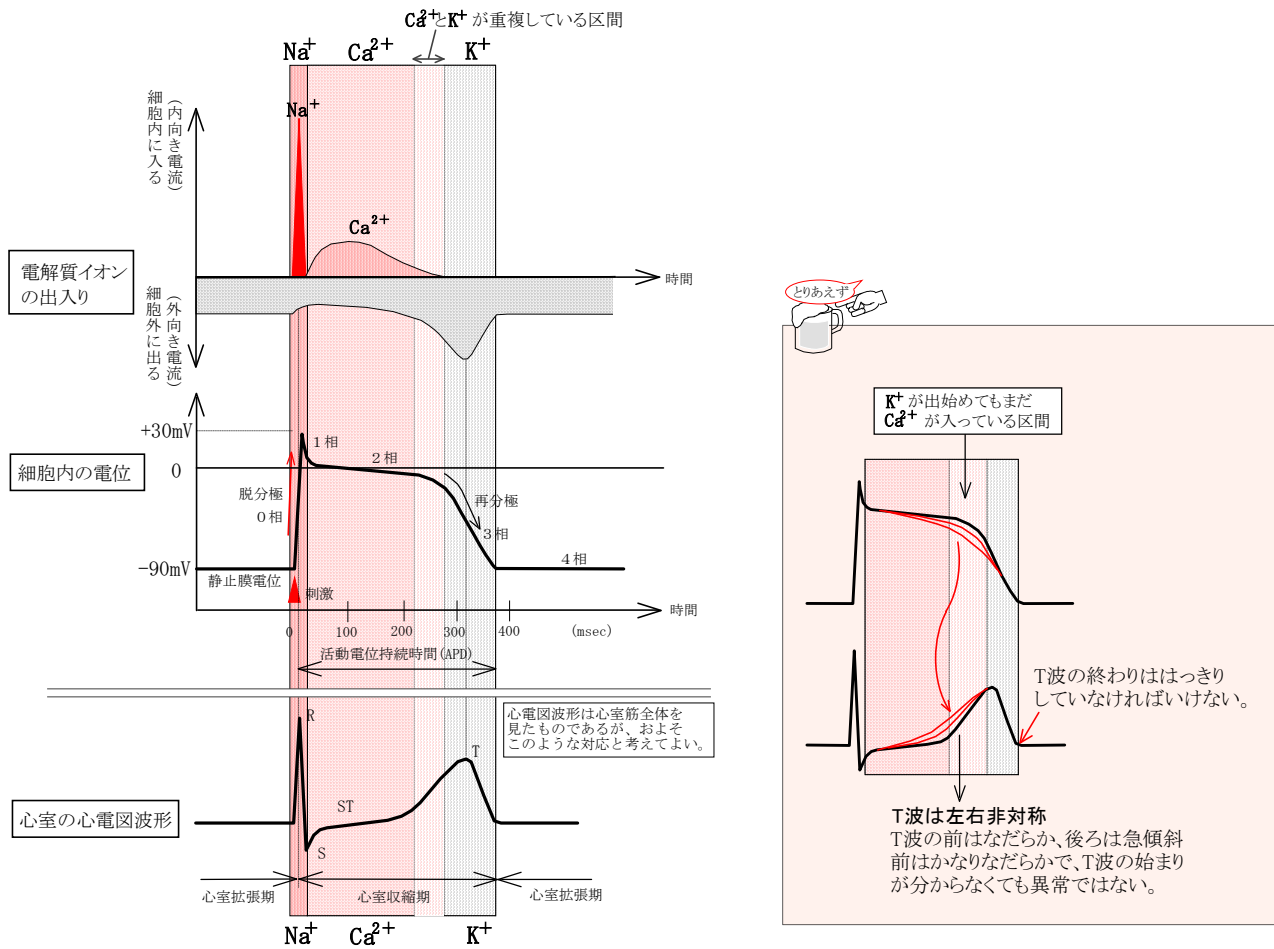


1.4 心室筋の活動電位と心電図波形の対応

心室筋での活動電位と実際に観察される心電図波形は図のような関係になっています*1。外部からの刺激（刺激伝導系からの電流の流入）によって、急速に電位が高くなる脱分極の時間を0相といい、これが次々と細胞を伝播して、心電図波形の**QRS波**を形成します。続く第1相は、Naチャンネルが閉じて脱分極が終了し、一過性にK⁺イオンで出ることによって膜電位がわずかに下がる時間です。第2相はNaに続いて細胞内に流入するCa²⁺イオンと流出するK⁺イオンとのバランスで維持されている時間でプラトー相ともいい、電位変動がほとんどないため心電図波形のレベルが変化しない**ST区間**にあたります。第3相は、急激な再分極時間にあたり、Ca²⁺イオンの流入が終わるとともにK⁺イオンが一過性に多量に流出することで起こり、**T波**を形成します。T波の前半部は、K⁺が出始めてもまだCa²⁺の流入が完全には終わっていない区間にあたるので傾斜がなだらかで、正常なT波は**左右が非対称形**になります。第4相は細胞が分極状態になっている時で、拡張期にあたります。0相から3相まで、心電図波形ではQRS波からT波終了まで（QT間隔）が、心室筋が収縮している時間にあたり、心室筋の**活動電位持続時間**（action potential duration; APD）といいます。



電解質イオンと心電図波形の関係



*1 心電図波形は心臓全体の活動を見ている。1つの心室筋細胞での電位変化と心電図波形を対応させた上図は正確なものではないが、電解質イオンと心電図波形の対応の概略を理解するためにはこのように考えてよい。



心臓が収縮運動をするので電気が起きるわけではない。電気が起きるので、その結果筋肉が収縮する。電気が起きても（心電図が発生していても）心筋が収縮しない、電気機械乖離という状態もある。

(5) 再分極が外膜側から始まった時

心室壁の最も外側に脱分極持続時間の最も短い細胞の層があるので、**再分極は心室筋の最外膜側から始まり**電位が低くなっていきます。この時、境界面には**外向きの電流**が発生し、外側の(+)電極に向かってくる**電流**となって**上向き**のT波になります。再分極の始まりの電位の低下は非常にゆるやかなので、最初は電流も小さく**T波の上昇は少しずつ始まります**。近接する細胞間の電位差はごくわずかずつであり、外側の細胞がこの電流によって再び分極することはないので、再分極は内側への一方向へ進んでいきます。

(6) 再分極が中央付近まで進んだ時

再分極が内側に向かって進むに従い、電流も大きくなって**T波の上昇も次第に大きくなって**いきます。

(7) 最内膜側が再分極を始めた時

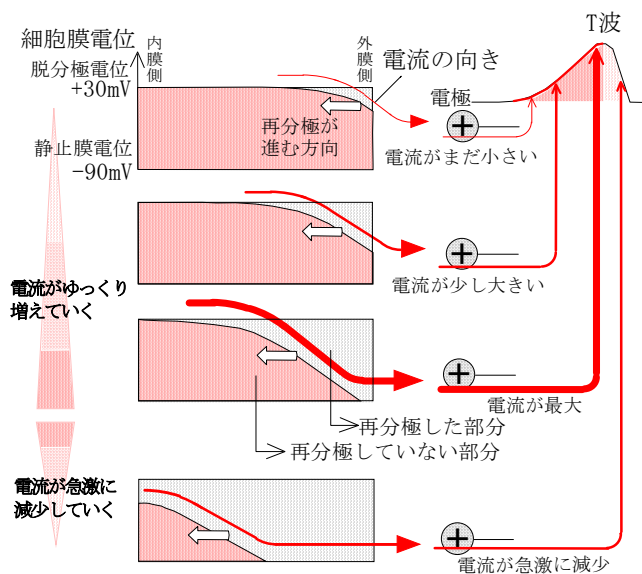
再分極が最内膜側に達した頃、外膜側の電位が静止膜電位まで低下して全体の電位差が最大となります。この時に電流が最も大きくなって**T波の振幅が最大**まで上がります。しかし、この時でも電位勾配が脱分極の時に比べて緩やかなためT波の最大値もR波よりは小さくなります※1。この後、内膜側の電位も急激に低下します。

(8) 心室全体が再分極した時

心室筋内に電位差がなくなり、電流は発生しなくなって再び基線に戻ります。脱分極に比べ再分極はゆっくりした変化なので、それが伝わる時間も遅く、**T波はR波より幅が広く**なります。

T波の始まりはなだらかで左右非対称形

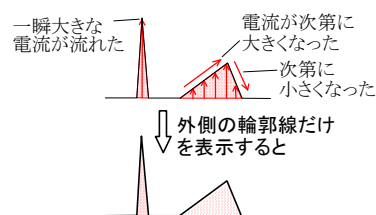
再分極の始まりは非常になだらかな変化で電流もゆっくりと増加しT波の前半は緩やかな上昇をしますが、内膜側で再分極が終了する時の電流は急速に減少するため、T波の後半は急傾斜で**左右非対称形**になります。



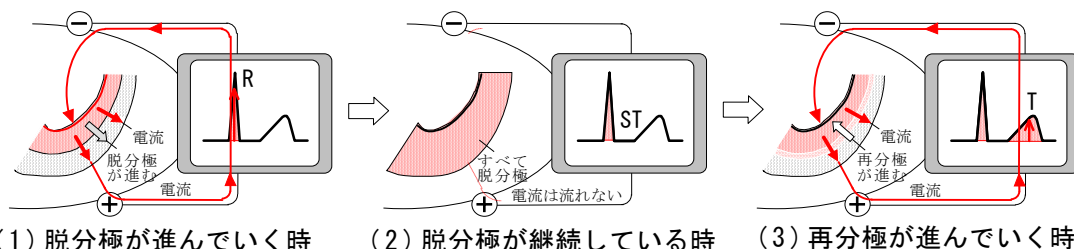
心室筋における再分極の進行とT波の形

心電図波形は輪郭だけを線で表している

上向きのR波やT波は、その波形の幅の間向かってくる電流が流れてくることで上向きの波形になりますが、画面や記録紙にはその外側の形=**輪郭線だけ**が表示されます。前半が向かってくる電流を、後半が逆向きの電流を表しているということではありません。



心電図波形は輪郭線を表す



(1) 脱分極が進んでいく時

(2) 脱分極が継続している時

(3) 再分極が進んでいく時

Note

※1 T波の振幅

電位の勾配が緩やかであれば、電位差(電圧)が同じでも通過する細胞膜は多く全体の抵抗値も大きくなる。したがって、オームの法則【電流=電圧/抵抗】から発生する電流値は小さくなるので、T波の最大振幅も低くなる。

とりあえず



おかわり!

心電図の『どうして?』 みんなの疑問① 基礎編



その1

K イオンはいつも出ている。Na イオンは入る一方。そのうちに、中と外が逆転しないのか?

チャンネルを通して出ているK イオンや脱分極時に一気にいったNa イオンは、一方でNa-K 交換ポンプによっていつでも戻されています。

くわしくは → 21ページ

その2

外向きに流れているのに、どうして「内向き整流」なのか?

静止膜電位を決めている Kチャンネルは「内向き整流型 Kチャンネル」であると本に書いてあります。そして、これは外向きよりも内向きの方に流しやすいからだ、とも書いてあります。しかし、K イオンはいつでも外に向かって流れていて、内向きに流れる時はありません。なのになぜ?と、多くの人がここでイオンチャンネルの勉強をあきらめてしまうようです。

実は、普段外向きに流れているとはいっても、それはあまり多くなく、もしも膜電位が低くなりすぎると、平衡を保つために外向きよりも**内向きにもっともったくさんのKを流すことができる**性質があるということです。しかし、正常な場合は、このような事態にはならないのです。

くわしくは → 20ページ

その3

Kチャンネルの名前は、IK1とか、IKtoとか、IKsとか、わけが分からないんだけど?

イオンチャンネルの名前には統一性がなく、見つかった順でつけられたり、性質の違いでつけられたりと統一性がありません。一度**記号の意味を知る**とその性質と役割が分かりやすくなります。

くわしくは → 19ページ

その4

刺激伝導系からの刺激で Naチャンネルが開くのは分かった。しかし、刺激伝導系から離れている細胞も脱分極するのはどうして?

刺激伝導系から直接電流が流れてきて脱分極するのは確かに刺激伝導系のそばの細胞だけです。しかし、この細胞が脱分極してその隣の細胞との間に電位差が生じると、そこに新たな**電流が発生**しこれが次の細胞の刺激となり、次々と伝わっていきます。

くわしくは → 26ページ

その5

電流は+から-に向かって流れる。では、+側の電極に向かって流れてくるのはどうして?

確かに電流は電圧の+から-に向かって流れます。しかし電極の +, - の記号は、機械が**表示する波形の向きを決めるための名前**で、電圧の +, - を示しているものではありません。+側と決めた電極に向かって流れてくる電流で波形を上向きに動かしているのです。

くわしくは → 29ページ

その6

R波は電位が上がる時なので上向き、では電位が下がる時のT波はどうして下向きにならないのか?

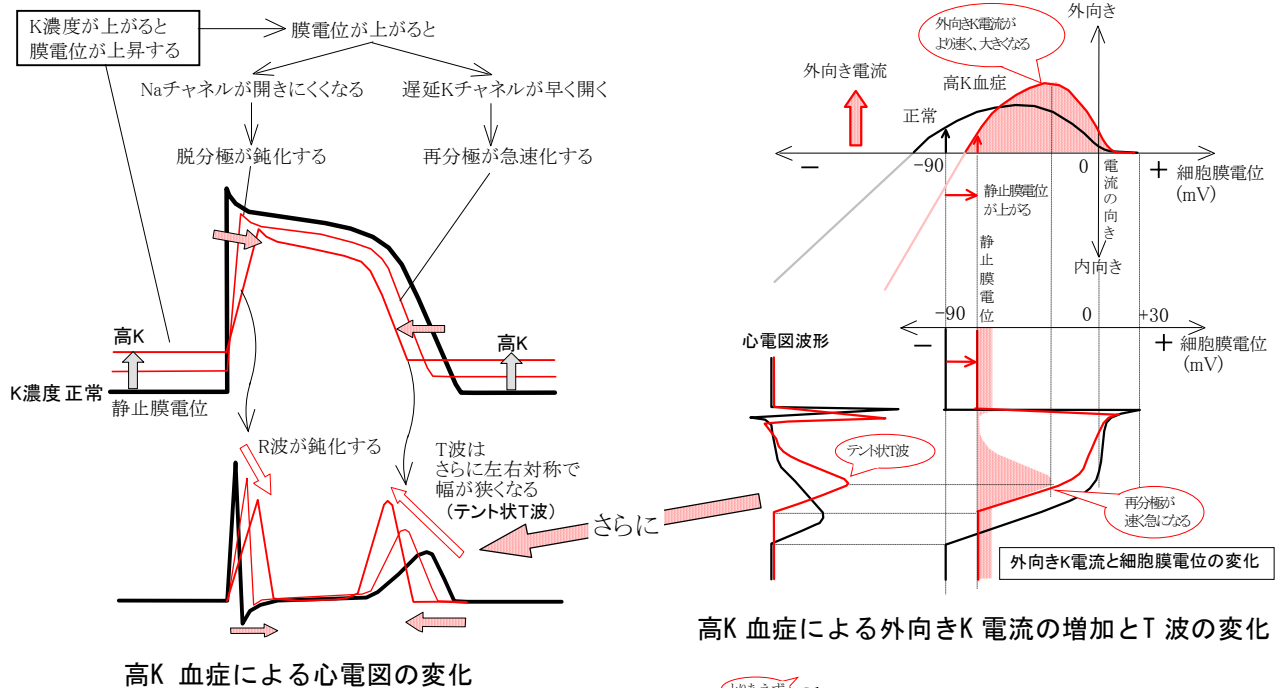
心電図波形は、心筋細胞で起きる電位やその変化そのものではありません。心室全体で脱分極や再分極が進行する時に発生する**電流を捉えて**波形にしています。電位が上がる脱分極も、下がる再分極も、心室筋の厚み全体でその時に発生する電流は同じで外側から見ると向かって流れてくるので、波形はどちらも上向きになります。

くわしくは → 32ページ

2.3 高カリウム(K)血症の心電図波形

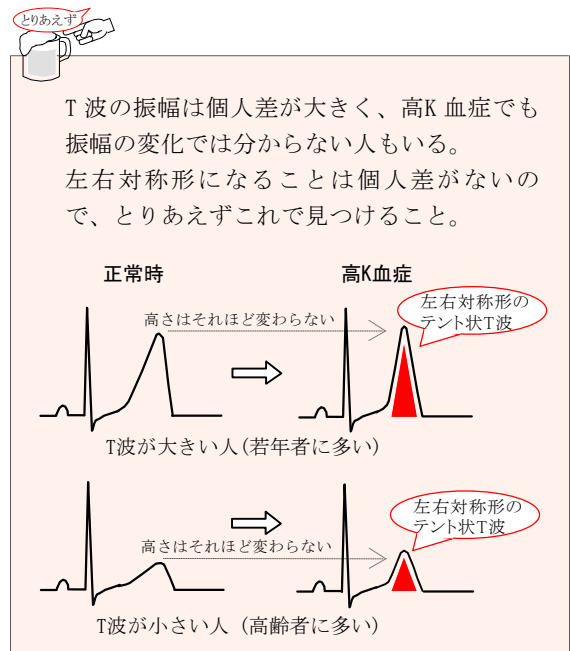
T波の変化

脱分極の後半に、静止膜電位を決めているKチャンネルを流れる外向きのK電流が増えるため再分極がより早く起きるようになります。さらに、電位依存性のある遅延Kチャンネルも早く開くようになるので、**再分極が急速に進む**結果、T波の形が**左右対称形で幅は狭く**なり、増高、尖鋭化していわゆる**テント状T波**を呈します。ただし、T波の振幅は個人差が大きく、電極の位置によってもかなり異なります。**テント状T波とは左右対称形**のものをさすことに注意し、大きさよりも左右対称形と幅の変化を重視すべきです。



QRS波の変化

高K血症で静止膜電位が上がるに従い、Naチャンネルが開き難くなるうえ、細胞内のマイナス電位に引きつけられる力も弱くなるためにNa⁺イオンの流入が緩慢になって、脱分極が鈍化し、**QRSの幅がより広**くなり、振幅も低下していき、より悪化すると、次第にT波と区別がつかないような形になって、心電図全体がSIN波状になってしまいます。さらに高K血症が進行し、静止膜電位が上がると、もはやNaチャンネルが開かなくなるので、**心停止**に至ります。

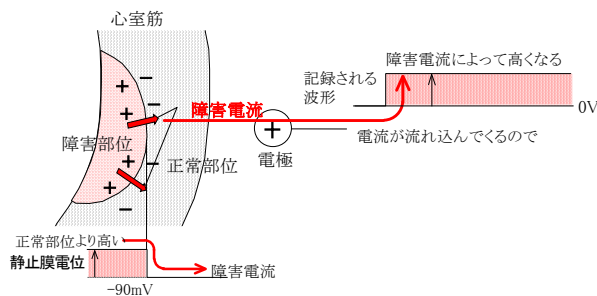


障害電流の影響

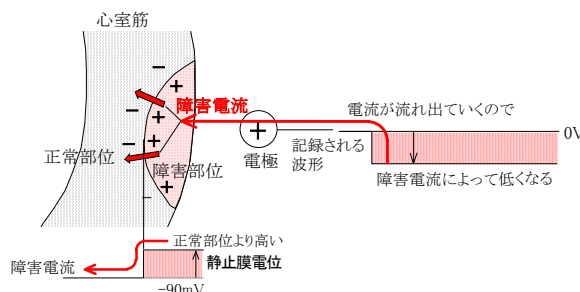
障害が心室筋の内膜側に起きている時は、そこから流れ出す障害電流は外膜側に向かい、外側にある+側電極から流れ込む形になるため、心電計の電位はその電流の大きさだけ上昇します。

逆に、障害が外膜側に起きている時は、障害電流は反対向きになるので、心電計の電位は低下します。障害の状態が一定であれば電流の大きさも変化せずこの電位変化も一定で定常的な直流電位になります。ただし、心電計では直流電位の変化は観察されず、障害電流が流れている時も常に**一定の基線として記録**されています。

障害が内膜側の場合



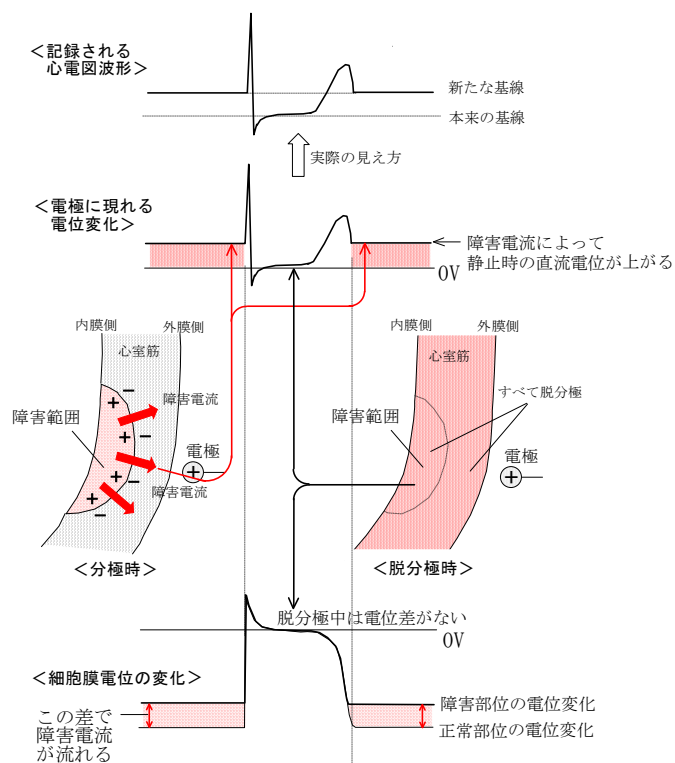
障害が外膜側の場合



障害電流による変化

心電図波形の見え方

障害部位もイオン交換ポンプが正常ではないだけで脱分極することはできるので、興奮時には正常部位と同じ電位まで上昇し、その時には電位差はなくなり、本来の0電位になります。その結果、興奮時の脱分極電位が、本来は変化していないにもかかわらず**相対的に変化して記録される**ので、脱分極期間に当たるST部分が低下あるいは上昇して観測されるわけです。



心筋障害がある時の電位変化と心電図波形

2.2 上室期外収縮、心房期外収縮 Premature supraventricular contraction:PSVC Premature atrial contraction : PAC, APC

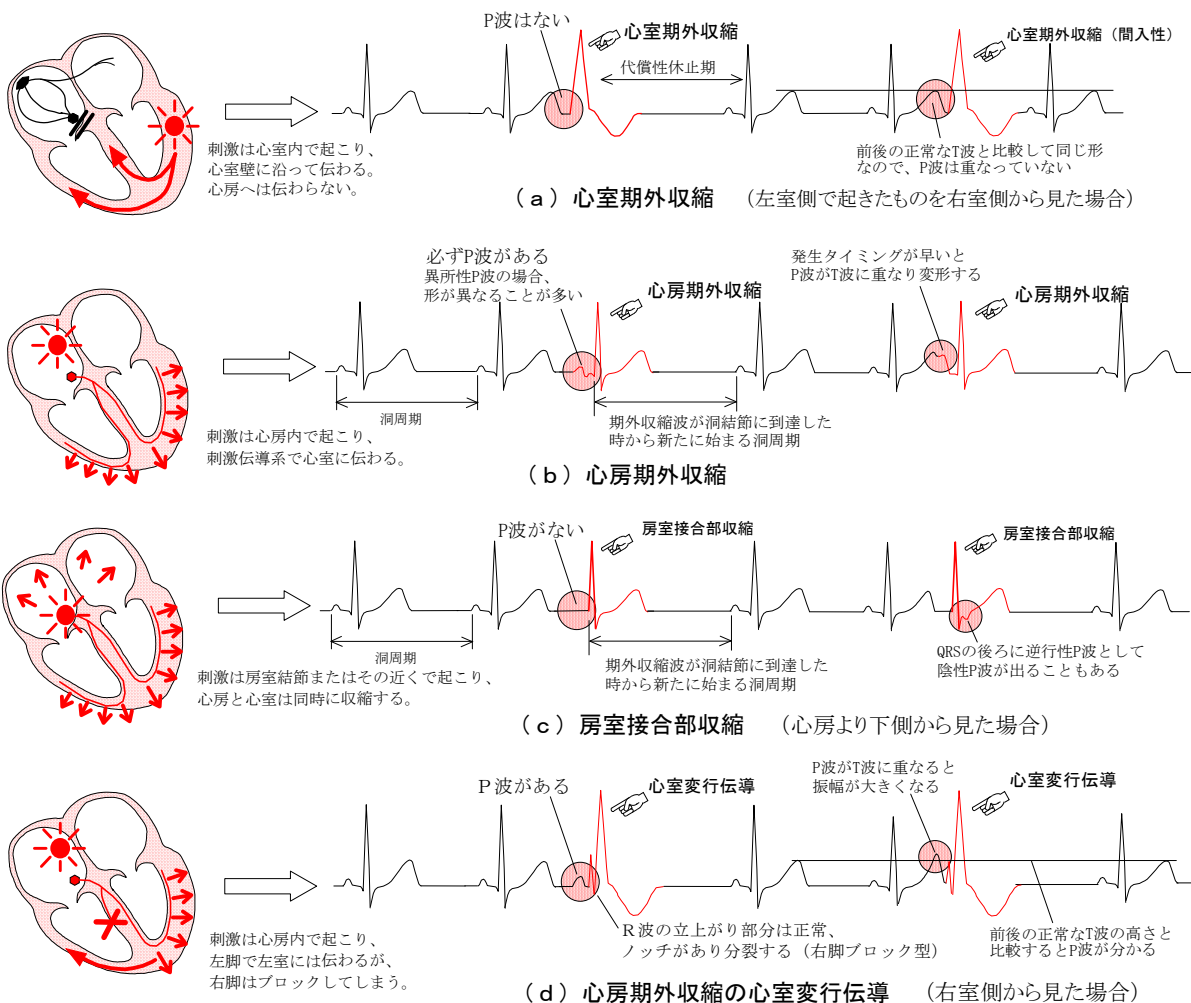
期外収縮が心室以外で発生した場合、**上室期外収縮** (Premature supraventricular contraction:PSVC) とします。これは、心房および房室接合部で起きたものの総称で、心室変行伝導を起こさない限りQRS以降は正常な形になります。

心房期外収縮

QRS波の前にP波があれば、**心房期外収縮** (Premature atrial contraction : PAC, APC) で、P波は洞結節以外の場所で発生するため**異所性P波**となつて形が異なります。ただし、発生タイミングが早いと直前のT波に重なるので見つけにくくなります。この時は、T波が2峰性になったり、頂点に重るとT波の振幅がやや大きくなるので、前後の**正常なT波と比較して確認**するようにします。また、心房期外収縮の後には、心房で発生した刺激が洞結節に進入し一旦リセットしてあらためて洞結節の自動能周期で始まることになります。そのため、心房期外収縮の後のRR間隔は正常な洞周期よりも少しだけ長くなります。この場合は、心室期外収縮とは異なり代償性休止期とはいいません。

房室接合部収縮

房室結節およびその近傍で期外収縮が起きた場合は**房室接合部収縮**で、心房と心室は同時に収縮するため、QRSに重なり**P波は見えなく**なります。房室結節より下部で発生すると、心室の方が心房より早く収縮するため、QRSのすぐ後ろに、心房を下から上に向かう**逆行性P波**として見えることがあります。



上室期外収縮と心室期外収縮の違い