

## 心臓カテーテル検査における心内圧測定・酸素飽和度測定

東北大学医学部附病院 放射線部 中田 充  
(東北循環器撮影技術研究会)

### ・ 心内圧測定

心内の血行動態や病態の把握、心機能を評価する上で、心臓カテーテル検査にて心内圧波形を測定し解析することは重要なことである。

右心系では末梢静脈より、スワン・ガンツ カテーテルやウエッジ・プレッシャー カテーテル等の先端バルーン付カテーテルを挿入し、大静脈、右心房、右心室、肺動脈、肺動脈楔入部等で心内圧測定を行う。肺動脈楔入部は、肺動脈末梢において血管腔を先端孔カテーテルで完全に楔入させるか、バルーンを用いて楔入させ圧測定するもので、記録される圧波形は時間的な遅れが見られるものの、肺毛細管床を通して肺静脈圧や左心房圧を反映する。(図1、2)

また、左心系では末梢動脈より逆行的にピッグテールカテーテル等を進めて左心室、大動脈等で心内圧測定を行う。なお、ASD等の欠損孔を介して経静脈的に左心カテを行うこともある。

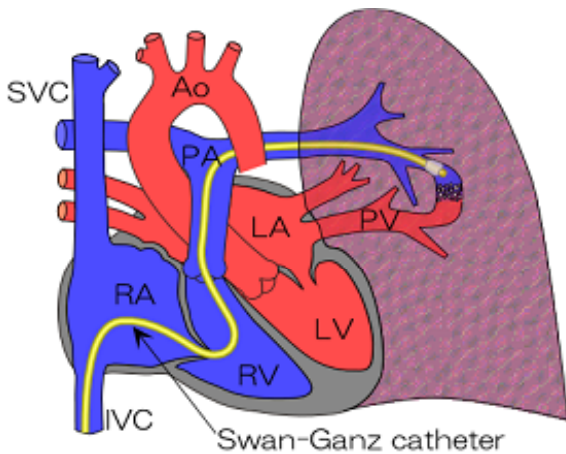


図1 肺動脈楔入圧測定

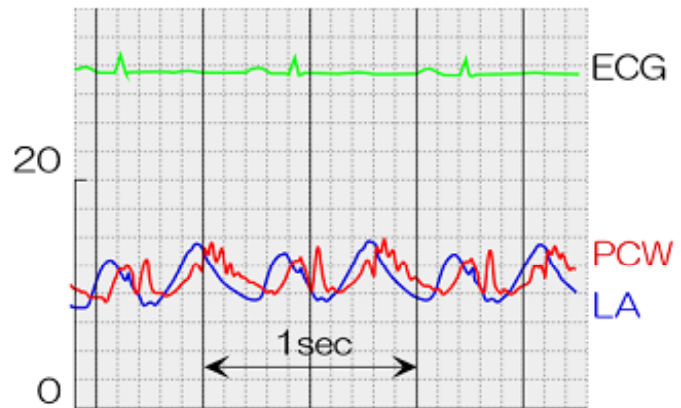


図2 肺動脈楔入圧(PCWP)測定と左心房圧(LAP)の同時圧

LAPに比べPCWPはわずかに時間的遅れが生じる

### 1. 測定方法

測定方法は間接法と直接法があり、一般的に間接法が用いられる。

#### 1-1 間接法 (water-filled 法)

water-filled 法とは、カテーテルと血圧測定用トランスデューサーを接続し、カテーテル内を生理食塩水で満たし、心腔にあるカテーテル先端の圧波をカテーテル内の生理食塩水を媒体としてトランスデューサーで電気信号に変換し、オシロスコープ等の測定器で圧波形を測定する間接測定法である。圧に対する信頼性は内腔が広くカテーテルが短いほど正確である。

この方法では波動エネルギーの伝播作用を利用しているため、圧波形の時間的遅延や、使用カテーテルの性能(硬さ、弾性、太さ、長さ)、回路内への気泡混入等によってアーチファクトを生じる。(図3)

#### 1-2 直接法 (カテ先マノメータ法)

小型化されたトランスデューサーを先端に装着したカテーテルを用いて、心内の圧波を直接電気信号に変換して測定する方法である。時間的遅延、振動によるアーチファクト等のないきれいな圧波形が測定できる。

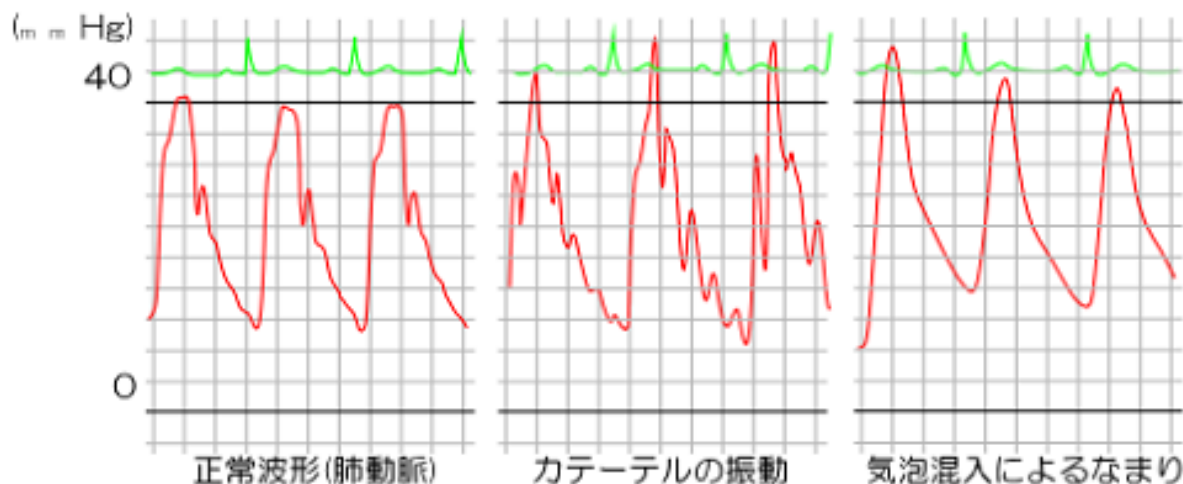


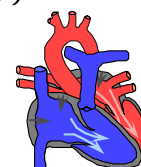
図3 water-filled法における圧測定時のアーチファクトの一例

## 2. 心内圧周期

心内圧周期は大きく拡張期、収縮期に2分され、さらに以下の5期に細分される。(図4、5)

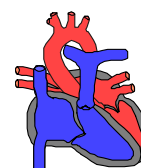
### (1) 心房収縮期

拡張後期においては心室と心房は広い房室弁口により共通腔となり、心室圧と心房圧は等しくなる。洞結節から興奮が起こり、心房収縮が起こると大部分の血液は心室に流入し、わずかの血液が静脈に逆流する。心内圧変化としては、心房内圧、心室内圧共にわずかに上昇する。



### (2) 等容性収縮期

心房収縮が終了しかけると、心室の興奮が始まり心室収縮が始まり、乳頭筋も収縮し、腱索が引っ張られ、房室弁が引き寄せられ、心室圧も高まり房室弁は閉じる。房室弁が閉じ、心室内圧が上昇し半月弁が開くまでの間を等容性収縮期といい、この期間中の心室容積は変わらない。



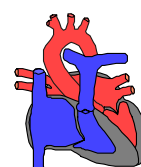
### (3) 駆出期

心室壁全層が興奮し、心室内圧が動脈圧を上回ることにより半月弁が開き、血液は駆出される。この駆出期においては心室と動脈は共通腔となっているため、心室内圧、動脈圧波形はほぼ等しくなる。心室収縮時には心房は弛緩し、再び血液が心房内に充満し始める。



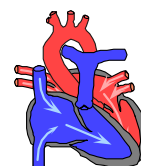
### (4) 等容性弛緩期

心室の駆出が減少すると、心室圧、動脈圧共に下降し、半月弁直上の血液は逆流を始め、弁にぶつかって半月弁は閉じる。この後房室弁が開くまでの期間を等容性弛緩期という。



### (5) 充盈期

心室弛緩期の中に心室内圧は急峻に下降し、間もなく房室弁が開き、心房、静脈にたまっていた血液は急速に心室に充満する。心室容積が最大に達する頃、洞結節が興奮し、心房収縮が始まり、続いて心室収縮と収縮周期が繰り返される。



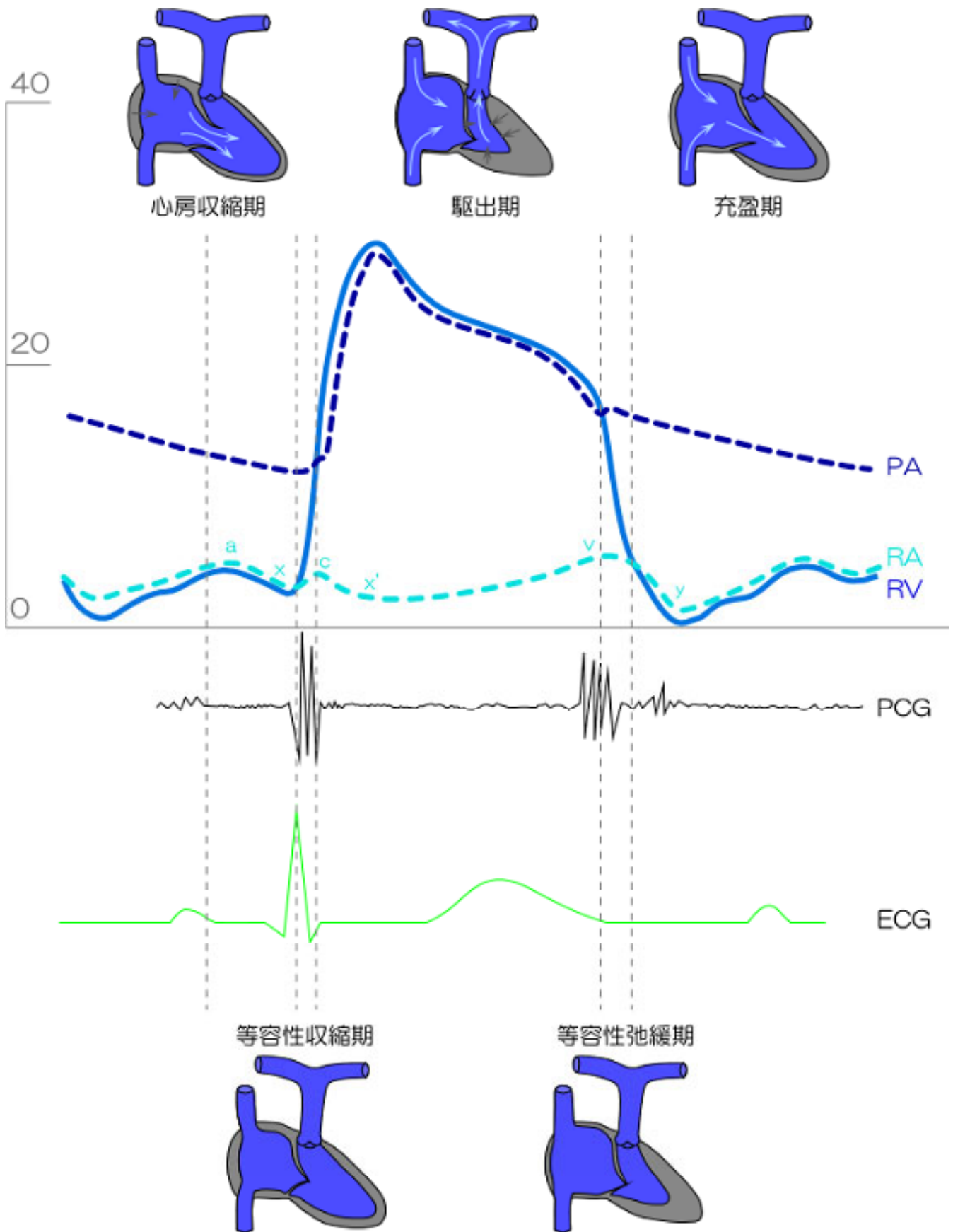


図4 右心系における心臓収縮周期

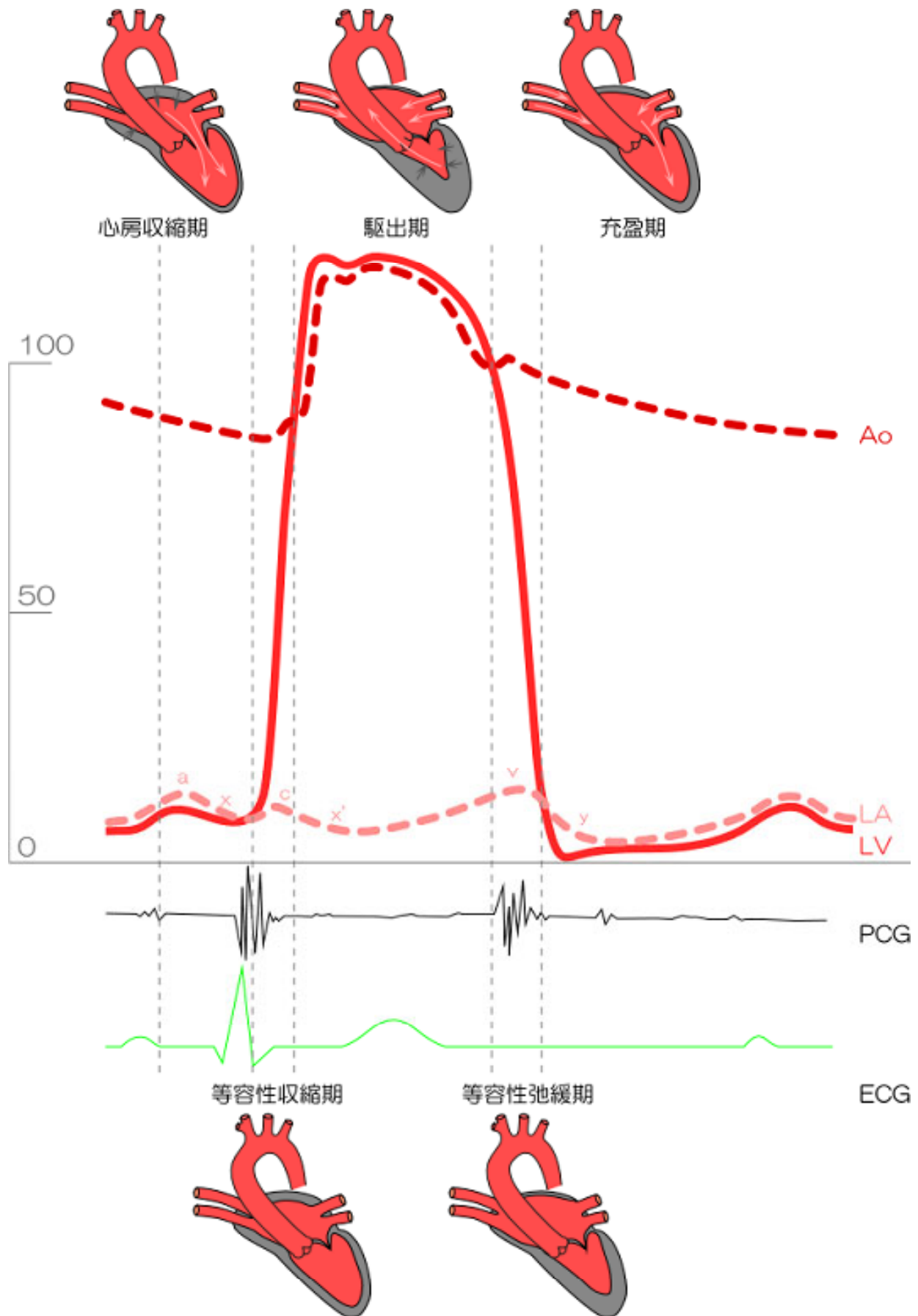


図5 左心系における心臓収縮周期

### 3. 各部位における心内圧波形

正常心内圧波形は右心系、左心系に関わらず、心房圧波形、心室圧波形、動脈圧波形 3 種類に大別され、それぞれ特徴のある波形を示す。

#### 3-1 心房圧波形（上下大静脈、右心房、冠状静脈洞、肺動脈楔入部、左心房、肺静脈）

基本的には a、v の陽性波、x、y の陰性波からなり、心房圧波形においては x 下降脚の途中に房室弁が心房側に膨隆するために生じる小さな陽性波（c 波）が存在する。（図 6、7）

測定時には直接圧と平均圧を記録し、正常圧は右心房においては平均圧で 8mmHg 以下、肺動脈楔入圧は平均圧で 12mmHg 以下ある。

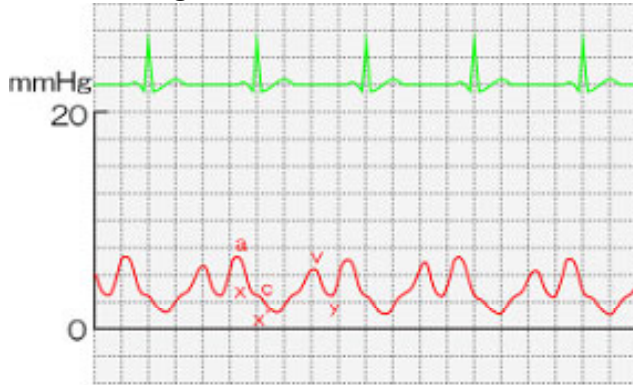


図6 正常右心房圧波形

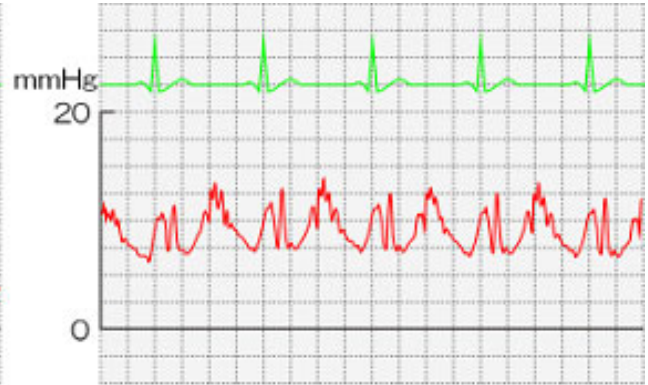


図7 正常肺動脈楔入圧

#### 3-2 心室圧波形（右心室、左心室）

心室内圧波形は、心電図 Q 波にわずかに遅れて心室の収縮が始まるとともに急激に上昇する。動脈への駆出が終了すると、心房圧を下回るまで下降し、房室弁の開放後、心室内に血液が充満するにつれ上昇し、心房収縮によりわずかに上昇した後、再び心室収縮が起こることにより、再び急激に上昇する。（図 8、9）

心室内圧における平均圧は生理学的意義をもたないため、記録は行わない。通常、収縮期圧を計測しやすい感度にて記録し、拡張終期圧（EDP: end diastolic pressure）を計測しやすい感度に変え、高速のペーパースピードで記録を行う。拡張終期圧の解析は、心室の機能評価や病態を把握する上で重要である。正常圧は右心室で最大収縮期圧 25mmHg 以下、拡張終期圧 8mmHg 以下、左心室においては最大収縮期圧 140mmHg 以下、拡張終期圧 12mmHg 以下である。

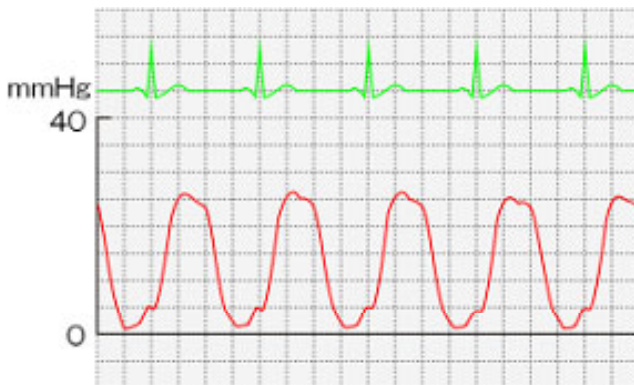


図8 正常右心室圧波形

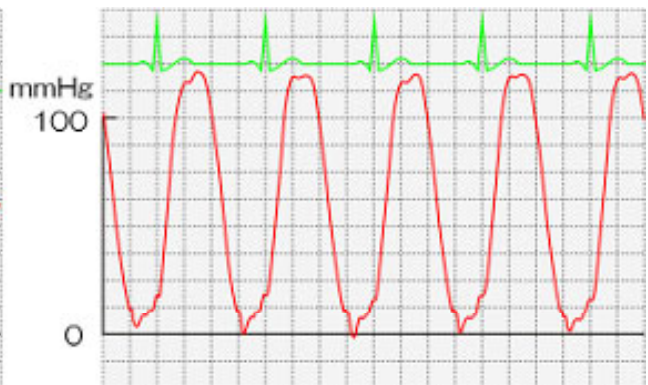


図9 正常左心室圧波形

#### 3-3 動脈圧波形（肺動脈、大動脈）

動脈圧波形は駆出期において心室圧波形とほぼ等しくなる。そのため、半月弁の開放と同時に急激に上昇、その後緩徐に下降し、半月弁が閉じたときに結節が生じる。その後、徐々に下降し拡張期圧となる。（図 10、11）

心房圧波形記録と同様、測定時には直接圧と平均圧を記録し、正常圧は肺動脈において収縮期圧 25mmHg 以下、拡張期圧 12mmHg 以下、平均圧 20mmHg 以下で、大動脈では収縮期圧 140mmHg 以下、拡張期圧 90mmHg 以下である。

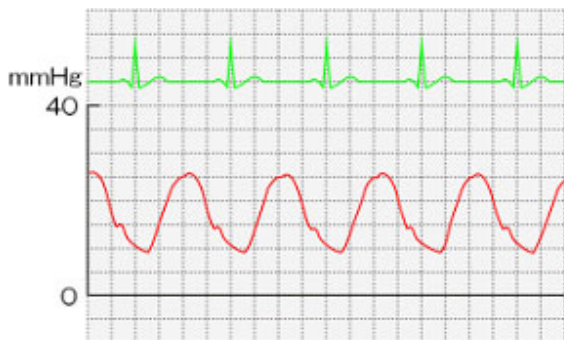


図10 正常肺動脈圧波形

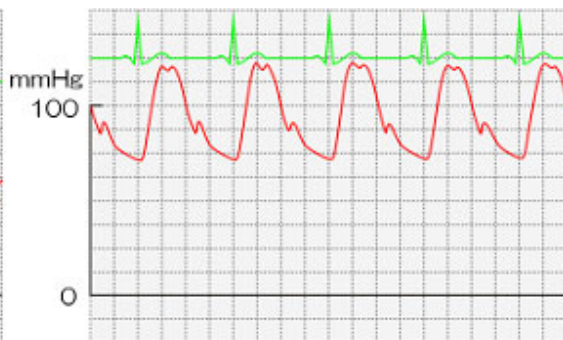


図11 正常大動脈圧波形

#### 4. 引き抜き圧測定・同時圧測定

##### 4-1 引き抜き圧測定

心内腔や血管に狭窄などが存在する場合、その遠位側と近位側の間には圧較差が生じる。その部分を、カテーテルを引き抜きながら連続的に圧波形を記録し、圧較差の評価を行う。肺動脈弁狭窄症 (PA RV) や大動脈弁狭窄症 (LV Ao)、大動脈縮窄症 (aortic arch des.Ao)、心房中隔欠損症 (LA RA) 等では重要な測定項目の一つである。(図 12、13)

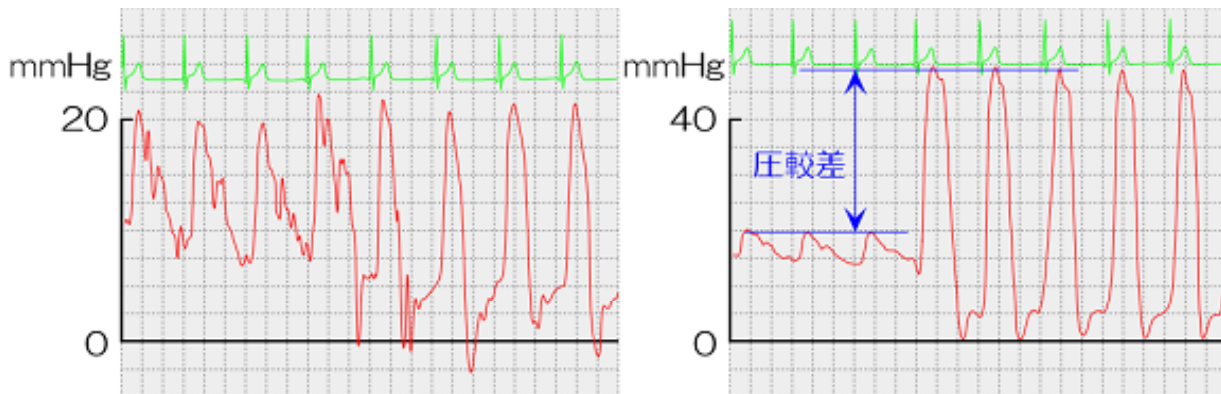


図12 肺動脈から右心室への引き抜き圧測定

左が正常、右が肺動脈弁狭窄症における引き抜き圧測定のものである。肺動脈弁狭窄症においては収縮期圧に圧較差が生じる。

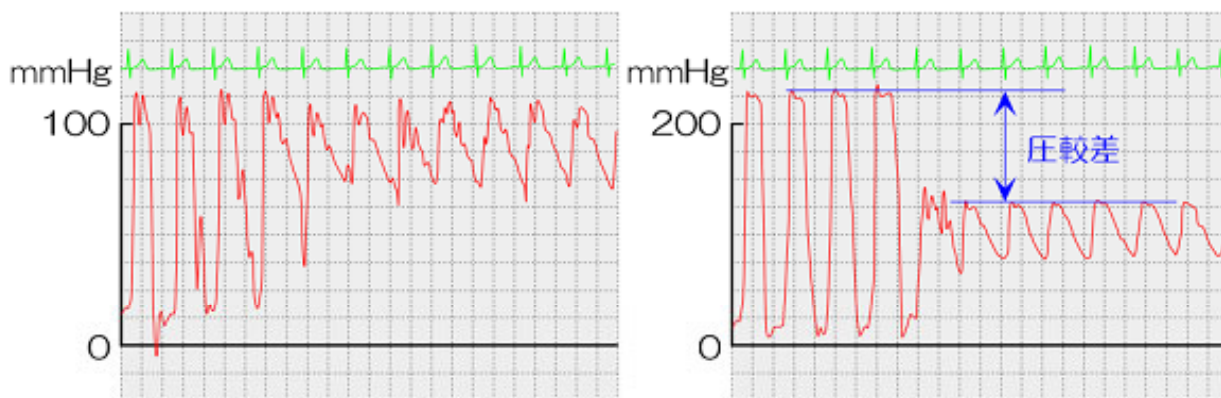


図13 左心室から大動脈への引き抜き圧測定

左が正常、右が大動脈弁狭窄症における引き抜き圧測定のものである。大動脈弁狭窄症においては収縮期圧に圧較差が生じる。

なお、通常の心臓カテーテル検査においても、心内圧測定の際、肺動脈 - 右心室間、左心室 - 大動脈間において、ルーチンとして引き抜き圧測定を行う。

#### 4-2 同時圧測定

2つの圧測定回路を用いて狭窄部の遠位側と近位側とで同時かつ同一感度にて圧測定を行うもので、僧帽弁狭窄症(PCW - LV)や大動脈弁狭窄症(LV - Ao)、大動脈縮窄症(aortic arch - des.Ao)等の検査にて行われる。(図14)

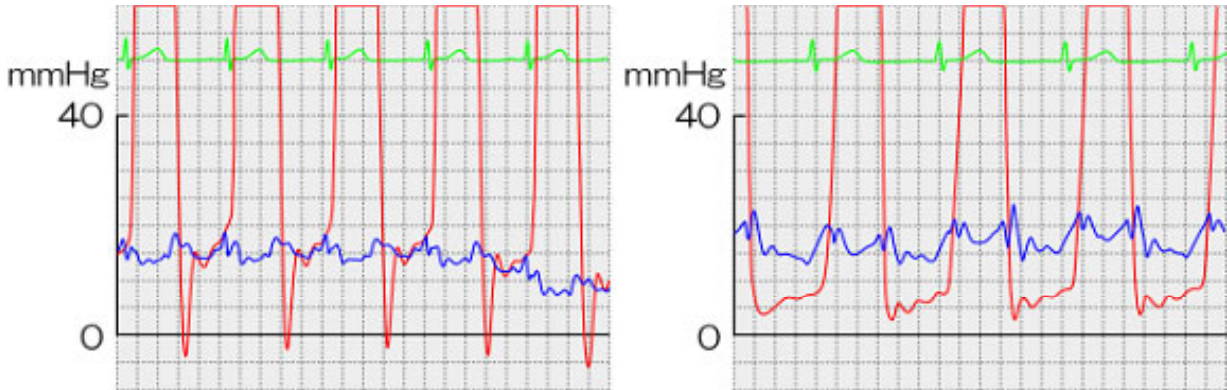


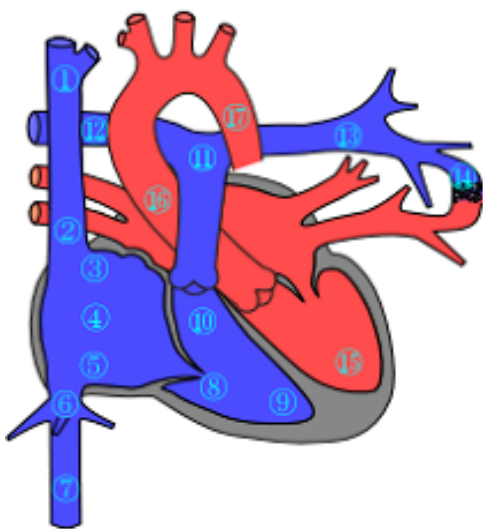
図14 左心室圧と肺動脈楔入圧との同時圧測定

左が正常、右が僧帽弁狭窄症における同時圧測定のものである。正常例では拡張終期圧において2つの圧波形の重なりが生じるが、僧帽弁狭窄症においては圧較差が生じているため2つの圧波形は重ならない。

#### ・ 酸素飽和度測定

心内および大血管内部の様々なレベルにおいてサンプリングを行い、酸素飽和度を測定することは、心大血管系の短絡の存在、方向、および量の決定に役立ち、先天性心疾患の血行動態を評価する上で重要である。(図15)

動脈血の酸素飽和度の正常値は95%以上であり、これを下回るようであれば右 左短絡が疑われる。また、肺動脈血の酸素飽和度の正常範囲は75~80%であり、予想以上に高い数値を示すときは左 右短絡の存在が疑われる。右心系において短絡部位を越えた位置で酸素飽和度の上昇に加え、動脈血の酸素飽和度の低下が存在すれば、両方向性の短絡を示唆している。



- 上大静脈 上部(無名静脈結合部付近)
- 上大静脈 下部(右心房結合部付近)
- 右心房 上部
- 右心房 中央部
- 右心房 下部または三尖弁付近
- 下大静脈 上部(横隔膜直下)
- 下大静脈 下部
- 右心室 流入部
- 右心室 心尖部
- 右心室 流出部
- 主肺動脈
- 右肺動脈
- 左肺動脈
- 肺動脈楔入部
- 左心室
- 上行大動脈
- 下行大動脈(動脈管より遠位部)

図15 心内および大血管部における酸素飽和度測定部位

## 1. 測定原理

測定原理は以下に示す通りで、検査する血液に 650m $\mu$  と 805m $\mu$  の光をあて、それぞれの吸光度を測定することにより酸素飽和度を算出する。透過光を用いる方法と反射光を用いる方法があるが、反射光を用いた方が赤血球数に影響されず安定した値を示す。

### 測定原理

Bouguer-Beer の法則から、濃度  $c$  mol/l、厚さ  $d$  cm の液層に入射光強度  $I_0$  の単色光が入り、出力  $I$  で出ていく場合、吸光度  $A$  は以下の式で表される。

$$A = \log(I_0/I) = \epsilon \cdot c \cdot d \quad (\epsilon \text{ は単色光に対する吸光係数})$$

Hb (濃度  $C_{Hb}$ 、波長 650m $\mu$ 、805m $\mu$  の光に対する吸光係数  $Hb^{650}$ 、 $Hb^{805}$ ) と、 $O_2Hb$  (濃度  $C_{O_2Hb}$ 、波長 650m $\mu$ 、805m $\mu$  の光に対する吸光係数  $O_2Hb^{650}$ 、 $O_2Hb^{805}$ ) の溶液で考えると、総ヘモグロビン濃度  $C$  は

$$C = C_{Hb} + C_{O_2Hb} \quad C_{Hb} = C - C_{O_2Hb}$$

波長 650m $\mu$ 、805m $\mu$  の単色光の吸光度はそれぞれ、

$$A^{650} = Hb^{650} \cdot C_{Hb} \cdot d + O_2Hb^{650} \cdot C_{O_2Hb} \cdot d$$

$$A^{805} = Hb^{805} \cdot C_{Hb} \cdot d + O_2Hb^{805} \cdot C_{O_2Hb} \cdot d$$

となり、分光透過率曲線から  $Hb^{805} = O_2Hb^{805}$  すると

$$\begin{aligned} \frac{A^{650}}{A^{805}} &= \frac{Hb^{650} \cdot C_{Hb} + O_2Hb^{650} \cdot C_{O_2Hb}}{Hb^{805} \cdot (C_{Hb} + C_{O_2Hb})} \\ &= \frac{Hb^{650}}{Hb^{805}} + \frac{(O_2Hb^{650} - Hb^{650}) \cdot C_{O_2Hb}}{Hb^{805} \cdot C} \end{aligned}$$

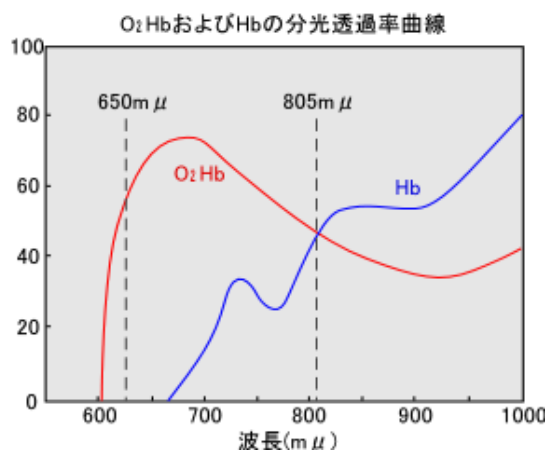
$$\frac{C_{O_2Hb}}{C} = \left( \frac{Hb^{805}}{O_2Hb^{650} - Hb^{650}} \right) \frac{A^{650}}{A^{805}} - \left( \frac{Hb^{650}}{O_2Hb^{650} - Hb^{650}} \right)$$

$$\frac{C_{O_2Hb}}{C} = a \left( \frac{A^{650}}{A^{805}} \right) - b$$

完全に酸化させたときは  $C=C_{O_2Hb}$ 、還元させたときは  $C_{O_2Hb}=0$ 、これにより  $a$ 、 $b$  の値は実測できる。したがって酸素飽和度  $S$  は

$$S = \frac{C_{O_2Hb}}{C} = a \left( \frac{A^{650}}{A^{805}} \right) - b$$

となり、波長 650m $\mu$ 、805m $\mu$  の光に対する吸光度の比により求めらる。



## 2. 短絡血流量

心大血管系の短絡血流量の算出には、肺血流量( $Q_P$ )、体血流量( $Q_S$ )、有効肺血流量( $Q_{eff}$ )を求めなければならない。有効肺血流量とは大静脈に還流してきた静脈血が肺に流れる量のことである。これらの血流量は Fick の原理式により求めることができる。血流量、短絡量を求める式と、右 左短絡が存在する場合の計算に用いるべき混合静脈血を表に示す。



$$\begin{aligned} \text{肺血流量 : } Q_P \text{ (l/min)} &= \frac{\text{酸素消費量 (ml/min)}}{\text{肺静脈血酸素含有量 (ml/l)} - \text{肺動脈血酸素含有量 (ml/l)}} \\ \text{体血流量 : } Q_S \text{ (l/min)} &= \frac{\text{酸素消費量 (ml/min)}}{\text{体動脈血酸素含有量 (ml/l)} - \text{混合静脈血酸素含有量 (ml/l)}} \\ \text{有効肺血流量 : } Q_{\text{eff}} \text{ (ml/min)} &= \frac{\text{酸素消費量 (ml/min)}}{\text{肺静脈血酸素含有量 (ml/l)} - \text{混合静脈血酸素含有量 (ml/l)}} \\ \text{左 右短絡量} &= \text{肺血流量 (} Q_P \text{)} - \text{有効肺血流量 (} Q_{\text{eff}} \text{)} \\ \text{右 左短絡量} &= \text{体血流量 (} Q_S \text{)} - \text{有効肺血流量 (} Q_{\text{eff}} \text{)} \end{aligned}$$

表. 左 右短絡が存在する場合に計算に用いるべき混合静脈血

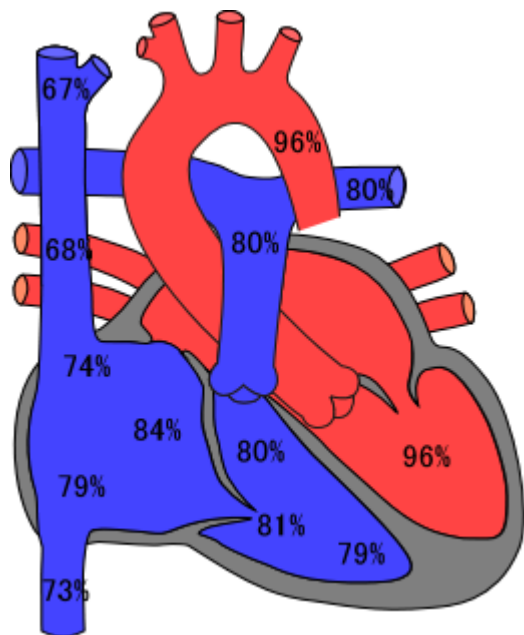
O <sub>2</sub> step-up により決定された短絡部位	計算に用いるべき混合静脈血
肺動脈 例：動脈管開存	右心室、oximetry run 施行中のサンプルの平均値
右心室 例：心室中隔欠損症	右心房、全サンプルの平均値
右心房 例：心房中隔欠損症	[ 3(SVC O <sub>2</sub> 含有量) + 1(IVC O <sub>2</sub> 含有量) ] ÷ 4

これらの式の中にある酸素消費量はサンプル収集時の患者の精神状態や技術的なミスによって測定値が大きく変動する。また、血中酸素含有量の測定には熟練が必要であり、信頼性の高いデータを示すのは非常に困難である。そこで、酸素飽和度と酸素含有量の関係式を用いて血流比、短絡率の式を進めると、以下に示すような比較的安定した値の得られる酸素飽和度だけ求められるシンプルな計算式になる。

$$\begin{aligned} \text{体肺血流比 : } Q_P / Q_S \text{ 比} &= \frac{\text{体動脈血酸素飽和度} - \text{混合静脈血酸素飽和度}}{\text{肺静脈血酸素飽和度} - \text{肺動脈血酸素飽和度}} \\ \text{左 右短絡率} &= \frac{\text{肺動脈血酸素飽和度} - \text{混合静脈血酸素飽和度}}{\text{肺静脈血酸素飽和度} - \text{混合静脈血酸素飽和度}} \times 100 \\ \text{右 左短絡率} &= \frac{\text{肺静脈血酸素飽和度} - \text{体動脈血酸素飽和度}}{\text{肺静脈血酸素飽和度} - \text{混合静脈血酸素飽和度}} \times 100 \end{aligned}$$

体肺血流比(Q<sub>P</sub> / Q<sub>S</sub> 比)は左 右短絡に関する生理学的情報を示し、Q<sub>P</sub> / Q<sub>S</sub> 比が 1.5 未満であれば左 右短絡量が少量であることを示し、1.5 ~ 2.0 の間にあれば中程度の短絡量、2.0 以上であれば短絡量が多いことを示す。また、Q<sub>P</sub> / Q<sub>S</sub> 比が 1.0 未満であれば正味の右 左短絡を示唆する。

心房中隔欠損症(ASD)での例を以下に示す。



左の模式図は心房中隔欠損症(ASD)の症例である。右心房中央部において有意な step-up が存在している。この症例においては動脈血酸素飽和度が 96%であるため、結果的に右 左短絡を否定できる。そのため、肺静脈酸素飽和度を 96%と仮定できる。また、先ほどの表から混合静脈血酸素飽和度は  $[3(67.5)+1(73)] \div 4 = 69\%$ となる。この症例での肺体血流比、左 右短絡率は以下のように求められる。

$$Q_P / Q_S = (0.96 - 0.69) / (0.96 - 0.80) = 1.68$$

$$\text{左 右短絡率} = (0.80 - 0.69) / (0.96 - 0.69) \times 100 = 40.7\%$$

#### 参考文献

1. 芹澤 剛, 監訳: ベイム・グロスマン 心臓カテーテル検査・造影・治療法. 原書 5 版, 南江堂, 1999
2. 小柳 仁, 門間和夫, 鈴木 伸: 新・心臓カテーテル法. 第 2 版, 南江堂, 1990
3. 太田昭夫, 監修, 長谷川光男他: 心血管造影技術マニュアル. 第 1 版, 三輪書店, 1994
4. Fowler NO: Cardiac Diagnosis and Treatment, ed. 3. Philadelphia, JB Lippincott, 1980, p.11