

特集

オシロメトリック法を用いた自動血圧測定の限界

落合 亮一*

はじめに

循環管理において、血圧測定は心電図モニターと同様に必須の項目である。血圧測定に“自動血圧計”と呼ばれる、オシロメトリック法を用いた自動測定法が導入されて20年近くが経ち、現在血圧測定は同方法で行われることが標準的となった。実際、筆者の施設でも手術室に水銀血圧計は存在せず、研修医のなかには水銀血圧計を用いて聴診法で血圧測定を行ったことのないものもある。しかし、非常に高い普及率をみながらオシロメトリック法については、測定法や測定値についてほとんど理解されていない点も興味深い。

本稿では、自動血圧計による測定値について、その問題点を検討する。

測定原理とシミュレーション

オシロメトリック法による血圧測定に際しては、上腕あるいは下肢に装着した血圧用カフに伝わった動脈の拍動性振動を感知し、利用することが測定原理となる。カフを収縮期血圧以上に加圧後、緩徐に減圧すると動脈血管壁の運動がカフに伝わり、振動（オシレーション：oscillometric pulse と呼ぶ）がカフに伝播する（実際には、加圧時にも減圧時にも同様の oscillometric pulse が捉えられる）。その際、脈拍毎の振動の大きさは、漸増した後にピークを迎え、漸減する。ここで、血圧測定用カフに伝わる振動をシミュレートすると以下のようなになる。

まず、血管の圧容積曲線を図1のように設定した^{1,2)}。条件として：

血管容積相対比を r とし、壁圧 (transmural pressure)

を P とした場合、 $P > 0$ mmHg では、 $r = 1 - k_1 \times \exp(-1 \times K_2 \times P)$ 、ただし $k_1 = 0.8$ 、 $k_2 = 0.03$ 。 $P < 0$ mmHg では、 $r = k_3 \times \exp(k_4 \times P)$ 、ただし $k_3 = 0.2$ 、 $k_4 = 0.12$ と仮定した。血管壁自体の持つ弾性のため、ある一定の容積以下では陰圧となる。

次に、動脈圧波形を図2のように設定した。実際の血圧波形とは異なるが、収縮気圧が130 mmHg 前後、拡張期圧が80 mmHg 前後、平均動脈圧が100 mmHg 前後で、心拍数は75となるように設定した。

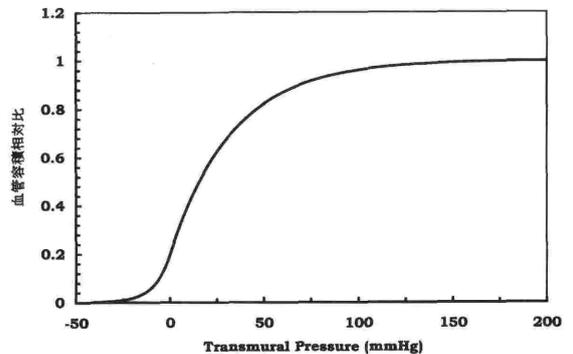


図1 血管の圧容積曲線

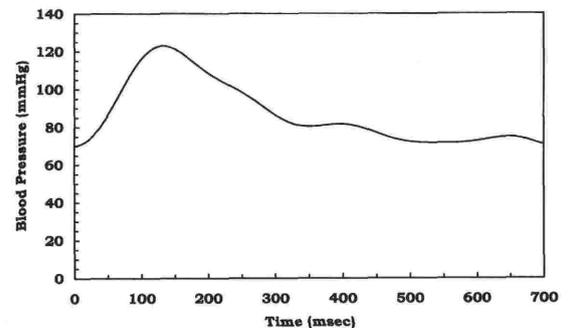


図2 動脈圧波形

*慶應義塾大学医学部麻酔学教室

一般の自動血圧計と同様に、カフを収縮期圧よりも高い値（160 mmHg）まで加圧後、緩徐に減圧する過程（16秒）で動脈圧とカフ圧の差、つまり壁圧（transmural pressure）を求めた。図3にカフ圧、脈波容積変動分をプロットした。カフ圧は160 mmHgより直線的に低下すると仮定し、容積変動分としては基線となる直流成分も重畳してある。実際に評価の対象となるのは、脈波容積変動分と直流成分、つまり基線との差で図4に示した。図中、矢印で示した拍では、振幅が最大値を示すが、今回の検討では振幅の大きさは基線からの振幅とした。振幅の絶対値を対象としている機器もあり、振幅の定義については一定の見解は得られていない。理想的な状態では、図のように振幅は斬増と斬減を示し、ピーク値を求めることが可能となる。

振動波形が最大の振幅を示すカフ圧では、壁圧（transmural pressure）が0となり、血管壁のコンプライアンスは最大となる。通常は、最大振幅を示すカフ圧をもって、平均動脈圧とすることが多い。

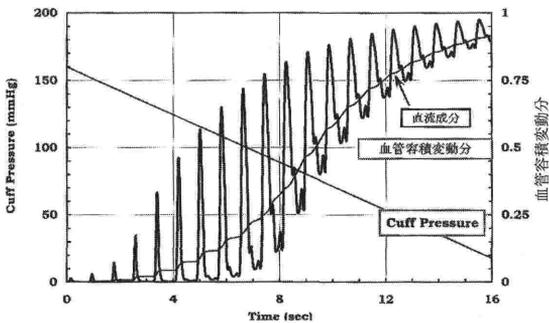


図3 カフ圧と血管容積変動分の変化

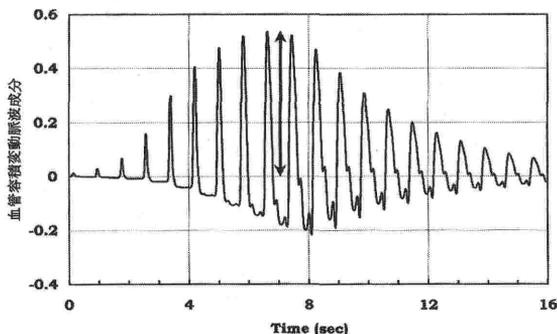


図4 血管容積変動脈波成分の変化

この血管内容積変動の振幅を基に、収縮期血圧あるいは拡張期血圧をどのように求めるのであろうか。主に用いられている手法としては、振幅変動曲線の振幅について最大振幅に対する比率で求める方法と、斬増、斬減の slope を用いる手法が用いられている。ここでは、最大振幅値に対する比率（systolic ratio と diastolic ratio）で考える。実際には、聴診法で求めた収縮期・拡張期血圧に一致するよう各比率を求めているが、報告あるいは機器によって一定の値は得られていない。一般的に systolic ratio としては、最大振幅の40%から75%の値が、diastolic ratio としては65%から86%までの値が紹介されている。ここでは、systolic ratio として最大振幅の40%、diastolic ratio として80%を採用した³⁻⁷⁾。

図5に収縮期圧・拡張期圧の求め方を示した。血圧波形の設定は、136/85 mmHg（平均100 mmHg）であるが、上記条件で求めた oscillometric 法による血圧は131/76 mmHg（平均100 mmHg）と、ほぼ同じ値が得られる。特に、平均動脈圧については、両者が一致している。

そこで、血圧測定中に血圧変動が生じた場合、自動血圧計を用いた計測値はどのように影響を受けるであろうか。

血圧測定中の血圧変動

図6に血圧上昇時のシミュレーションを示した。血圧測定16秒間の間に、血圧が137/84 mmHg（平均：100 mmHg）から、183/112 mmHg（平均：134 mmHg）に直線的に変化した状態をシミュレートした。最大振幅は151/93 mmHg（平均：110 mmHg）で得られ

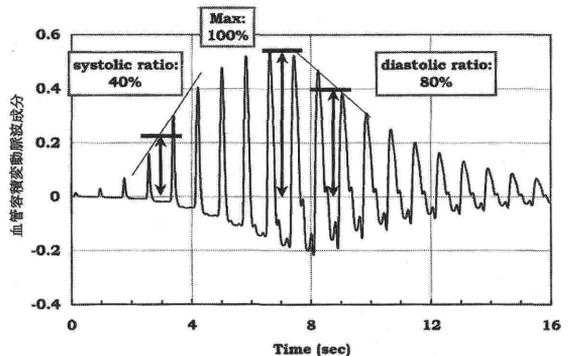


図5 収縮期・拡張期血圧の求めかた

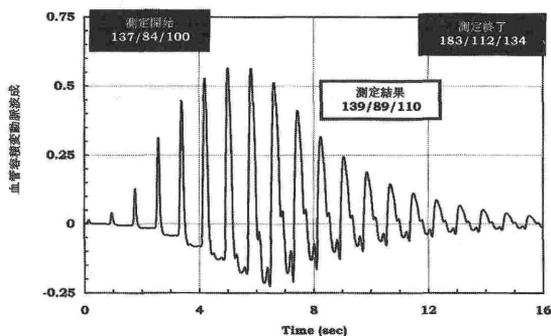


図6 血圧上昇時の測定値

たが、そのときの最大振幅を基に systolic/diastolic ratio を用いて収縮期・拡張期圧を算出すると、139/89 mmHg (平均: 110 mmHg) という値が得られる。測定終了時、つまりモニター上に計測値が表示される時には、183/112 mmHg (平均: 134 mmHg) まで血圧上昇が生じているが、実際に平均血圧・最大振幅を決定する段階では血圧は上昇している途中であり、実際の値よりも低い血圧値が表示される結果となる。

同様に、測定中に血圧低下が生じた場合のシミュレーションを行うと以下のような結果が得られた。血圧測定開始時の血圧は135/83 mmHg (平均: 100 mmHg) とし、16秒の測定時間中に89/55 mmHg (平均: 66 mmHg) まで直線的に低下したと仮定した。最大振幅は、108/67 mmHg (平均: 81 mmHg) で得られ、血圧上昇時と同様の診断基準で血圧を算定すると、119/53 mmHg (平均: 80 mmHg) という値が得られた。つまり、測定終了時の血圧よりも高めに表示される結果となる。

自動血圧測定の問題点

オシロメトリック法を用いた血圧測定のシミュレーションを紹介した。今回は、限られた条件の下でのシミュレーションであり、必ずしも臨床における測定を反映していない可能性もある。また、機器によっては異なった方法を採用している場合もあり、結論は出せないが、いくつかの問題点が明らかになったものと考えられる。

1. 最大振幅をどこで求めるか

血管壁のコンプライアンスが最大値を示し、脈波成分の振幅も最大値を示すときに、カフ圧は平均血圧と一致する。その際、振幅の絶対値を評価

の対象とするかあるいは基線に対する振幅を対象とするか (つまり、陰性成分を除去して検討) については、結論が得られていない。今回は基線に対する変動分を対象としたが、メーカーによって検出方法は異なるようであり、異なった平均動脈圧の得られる可能性も否定できない。

2. Systolic ratio などは妥当か

最大振幅の何%をもって収縮期血圧あるいは拡張期血圧を決定するかについても、前述したように、結論がなく、メーカー毎に異なったアプローチを行っている。また上昇脚あるいは下降脚のスロープが、それぞれ最大値あるいは最小値をとるポイントを収縮期あるいは拡張期圧としている装置もある。脈波成分のエンベロープは個人差が大きく、単一の条件で正しい血圧測定が可能であるか十分な検討は行われていないのが実情であろう。今後の検討が必要であると考えられる。

3. 血圧変動時の対応は

さらに、紹介したように測定中の血圧変動が問題となる。今回は16秒間に大きな変動が生じることとしたが、実際の測定には1~2分程度が必要で、特に麻酔導入時や脊椎麻酔開始時など大きな血圧変動の生じる場面が問題となろう。いずれにしても、測定が終了し測定値が画面に表示される段階では、実際の血圧はさらに変動が進行しており、血圧上昇時には過小評価が、血圧下降時には過大評価のなされる可能性が高い。脈波伝播時間などを参考に、測定中の血圧変動の有無を示唆することが必要と考える。麻酔中の血圧測定については、その変動が最も重要であり、血圧計の特性を十分に理解することが正しいモニターのためには必須のことと考える。

4. 血管壁の物理的特性: 圧容積曲線の妥当性

今回のシミュレーションでは、血管の圧容積曲線を単一のものとして考えた。実際の血管の物理特性はヒステリシスを持ち、加圧時と減圧時では異なった曲線を示す。通常は、減圧時のほうがより低い圧で同じ容積が得られる。このため、実際の脈波成分の波形について提示したシミュレーションとは異なった波形が得られる可能性もある。しかし、得られた振動波形を処理するアルゴリズムは血管の物理的特性とは関係がないので、実際の血圧測定に近似したシミュレーションが可能であったものと考えられる。

5. 不整脈の対応

得られた振動波形から収縮期あるいは拡張期圧を求めるためには、脈波成分波形が一定の変化を示す必要がある。心房細動や心室性期外収縮が頻発している際には、測定が完了せず、何回も再測定を行うことをよく経験する。これは、複数のピーク値が得られたか、あるいはスムーズなエンベロップの得られていない可能性が高い。現在の測定アルゴリズムでは不整脈による影響に十分な対応は不可能であると考ええる。

結 論

以上、限られた条件でのシミュレーションであったが、オシロメトリック法による測定原理を用いて血圧測定を再現した。その結果、収縮期圧・拡張期圧の測定値に対して、多くの因子が影響を与えることが示されたものと考ええる。実際の臨床においては、少なくとも最大振幅から得られた平均動脈圧は“真の値”に近似している可能性が高いので、測定値の信憑性が疑われる場合、あるいは動脈硬化性病変などの場合に収縮期圧が平均動脈圧に比して極端に高い場合などには、平均動脈圧を診断あるいは治療効果判定のための指標にすべきであると考ええる。

さらには、カフによる駆血後の減圧時に指尖脈波の再開を検知し、収縮期圧を推定するオシロメトリック法が紹介されているが、他の指標を応用して収縮期圧を推定する可能性も今後検討する必要があるものと考ええる⁸⁻¹¹⁾。

文 献

- 1) Hardy HH, Collins RE : On the pressure-volume relationship in circulatory elements. *Med & Biol Eng & Comput* 29 : 565-570, 1982
- 2) Dahn I, Jonson B, Nilsen R : Plethysmographic in vivo determinations of elastic properties of arteries in man. *J Appl Physiol* 28 : 328-332, 1971
- 3) Geddes LA, Voelz M, Combs C, et al : Characterization of the oscillometric method for measuring indirect blood pressure. *Ann Biomed Eng* 10 : 6, 271-280, 1982
- 4) Drzewiecki G, Hood R, Apple H : Theory of the oscillometric maximum and the systolic and diastolic detection ratios. *Ann Biomed Eng* 22 : 88-96, 1994
- 5) Forster FK, Turney D : Oscillometric determination of diastolic, mean and systolic blood pressure—a numerical model. *J Biomech Eng* 108 : 359-364, 1986
- 6) Ng KG, Small CF : Changes in oscillometric pulse amplitude envelope with cuff size: implications for blood pressure measurement criteria and cuff size selection. *J Biomed Eng* 15 : 279-282, 1993
- 7) Rutten AJ, Ilsley AH, Skowronski GA, et al : A comparative study of the measurement of mean arterial blood pressure using automatic oscillometers, arterial cannulation and auscultation. *Anaesth Intensive Care* 14 : 58-65, 1986
- 8) Block FE, Fletcher MV, Morris TJ, et al : A clinical evaluation of rapid automatic noninvasive blood pressure determination with the Ohmeda 2120 "Return-to-flow"-method. *J Clin Monit* 7 : 241-244, 1991
- 9) Obrist PA, Light KC, McCubbin JA, et al : Pulse transit time: Relationship to blood pressure and myocardial performance. *Psychophysiology* 16 : 292-301, 1979
- 10) Geddes LA, Voelz MH, Babbs CF, et al : Pulse transit time as an indicator of arterial blood pressure. *Psychophysiology* 18 : 71-74, 1981
- 11) Gribbin B, Steptoe A, Sleight P : Pulse wave velocity as a measure of blood pressure change. *Psychophysiology* 13 : 86-90, 1976