ストレンゲージピンセットによる

脳血管非観血的血压測定法

—定量化への試み—

水谷 哲郎・杉田虔一郎*・景山 直樹

Blood Pressure Measurement of the Cerebral Artery with Strain Gauge Forceps

—A Trial of Quantitative Measurement
of Intraarterial Blood Pressure—

TETSURO MIZUTANI, KENICHIRO SUGITA* and NAOKI KAGEYAMA

Department of Neurosurgery, Nagoya University

**Department of Neurosurgery, Shinsyu University*

Summary

In order to measure blood pressure (BP) of the vessels without damage, forceps with a pair of strain gauges has been designed and the applicability to quantitative BP measurement with the forceps was examined.

Using 42 mongrel dogs BP of various arteries was measured by the strain gauge forceps and intraarterial cannulation method simultaneously. When the force of forceps made the artery to collapse, it was called "Maximum Force of Forceps" (MFF). MFF was well proportional to the intraarterial cannulation BP.

Small pieces of human cerebral arteries, obtained from 7 autopsies, were also examined by strain gauge forceps loading by hydrostatic pressure. From the results of measurement of human cerebral arteries in hydrostatic pressure, a formula was introduced. With the formula intraarterial pressure could be calculated from the diameter of artery and MFF. The formula was applied to measure the blood pressure during surgery of STA-MCA anastomosis, AVM, aneurysm and carotid cavernous sinus fistula.

Success of vascular anastomosis could be demonstrated quantitatively with measuring blood pressure of cortical MCA in STA-MCA anastomosis before and after the procedure. The change of blood pressure of draining vessel could show the extent of obstruction of feeding arteries in each step of extirpation of AVM. In carotid cavernous sinus fistula, remarkable change of blood pressure of intracranial internal carotid artery could be discerned after trapping of the fistula. In aneurysm operation, blood pressure measurement of parent artery helps detecting the stenosis after clipping or ligation of wide neck aneurysm.

Key words: blood pressure, vascular pressure, AVM, STA-MCA-anastomosis, formula

名古屋大学脳神経外科

*信州大学脳神経外科

〔連絡先：〒466 名古屋市昭和区鶴舞町65, 名古屋大学脳神経外科, 水谷哲郎〕

1978年5月22日 受稿

I はじめに

脳血管外科手術中、露出した血管をピンセットで挟む時、術者はピンセットを通して血管の緊張および拍動等を指先に感ずることができる。このピンセットで血管を挟んだ時に指先の感覚で得られるものを定量的に計測するためピンセットにストレンゲージを装着し、ピンセットの先端に加わった力を記録できる本装置を製作した。このストレンゲージピンセットで血管を挟む方法で、その血管の相対的な圧変化を十分に計測できることはすでに報告した⁹⁾。本研究では、その測定値と実際の血管内圧の絶対値との関係を知るべく、動物の血管およびヒト剖検脳血管の実験とさらに臨床例応用を重ね、本法で血圧の絶対値を±10%以内の誤差で知りうることを確かめた。

II 方 法

1. 装 置

血圧測定用のストレンゲージピンセットは、血管を挟むピンセットの部分とこれを定速にて開閉させるクサビおよびこれを前後に駆動するマイクロモーターから成っている。ピンセットには先端から120 mmの部位に一对のストレンゲージが装着してある。ピンセットが閉じる時、これに挟まれた血管の内圧および壁の弾性によりピンセットがたわみ、それがストレンゲージの出力電圧となって導出され、紙送り記録計に記録される。出力電圧は分銅によるグラムの単位にて校正され、出力とグラム数とは直線的な比例関係にあった。ピンセットで血管を挟む時、血管の位置をピンセットの先端から5 mm手元へずらすと測定値は4%少なくなつて現れる。ストレンゲージピンセットで測定できる範囲は0から120 gまで可能であり、その測定誤差は1%以下であった(Fig. 1)。外径0.6 mmから9 mmまでの血管では血圧0から300 mmHgまでの測定値は0から90 gまでであった。ピンセットの開閉速度はモーターの電圧を変えることによ

Fig. 1 Schematic drawing of the strain gauge forceps. 1: Micromotor. 2: Deceleration gear. 3: Wedge of reciprocal movement. 4: Strain gauge.

って6段階に切換えることができ、径の細い血管では閉じる速度が遅いほど記録を読みとるうえで誤差が少なくなる。以下ピンセットで血管を挟み、これを閉塞した時の力を最高ピンセット圧“Maximum Force of Forceps”

(MFF)とする。MFFは最高血圧(systolic pressure)を表している。これは測定血管の末梢側を切断しておいて、MFFの測定点ではじめて血液の拍出がみられなくなることにより確かめた。

2. 動物実験—生体内血管の最高ピンセット圧(MFF)

雑種成犬42頭(体重8~12kg)を用い、麻酔はすべてインゾール(thiamilal)の分割静注による全身麻酔にて行い、原則的には自発呼吸で行った。血管を露出し乾燥を防ぐために流動パラフィンを塗布した。血圧測定は血管露出のための影響がなくなった頃に行った。これと同時にMFFを測定している血管に、カニューレを心臓側に向けて挿入しておき、カニューレ内圧とMFFとを比較した。カニューレ内圧は日本光電製の電気血圧計に接続して記録した。カニューレ内にはヘパリン加生食水を満たし、全身的にもヘパリン加生食水を点滴静注してカニューレ内の血液凝固を防いだ。

MFF測定の実際の記録では、ピンセットの先端が血管に接触した時点でグラフは立上がり血管の拍動を拾い始める。血管を閉じていくに従い拍動は一度大きくなり再び小さくなって、血管を完全に閉じた時点で消失し直線となる(Fig. 2)。この拍動が消失した点で変曲点を形成し、この点をMFFと呼び、その時の電圧はg数で読みとる。人為的に血圧を変動させる時には昇圧剤として

Fig. 2 Records of blood pressure by cannulation method and pinching process of common carotid artery by strain gauge forceps. (Dog)

When forceps touches the artery, it begins to pick up pulsation. When the lumen of the artery is collapsed, the pulsation disappears, then the curve makes inflection point (open arrow), which names “Maximum Force of Forceps” (MFF). When force of the forceps goes up to MFF point, the cannulation blood pressure abruptly falls to about half of the initial blood pressure. The cannula is placed at the distal part of the artery.

ネオシネジン(phenylephrine hydrochloride), 降圧剤としてアルホナード(trimethaphan), ニトロプルシド(sodium nitroprusside)を用いた。血管の外径を測定する際には、ピンセットが血管に接触したことを記録紙上にて確認し、その時のピンセットの開き幅をノギスにて計測した。この方法での血管外径の読み取り誤差は ± 0.1 mmであった。

3. ヒト剖検脳の摘出血管に静水圧をかけた時の最高ピンセット圧 (MFF)

ヒト頭蓋内血管において血管内圧と MFF の関係を測定するため、7 例のヒト剖検脳より脳血管を摘出し、これに水柱圧をかけ MFF を測定した。摘出血管の両端にカニューレを挿入し、一方から水圧をかけ、他方からその圧を電気血圧計にてモニターした。水圧をかけて血管をピンセットで挟む時の記録は拍動がないため一本の曲線として記録され、ピンセットで閉じた時点で変曲点を形成し線の勾配が変わる。この変曲点を水圧による MFF とした。同時にこの変曲点までピンセットを閉じた時、水の流出も停止することを確認して血管閉塞が起きたことを実証した。摘出した脳血管は内頸動脈、前大脳動脈、中大脳動脈、後大脳動脈、椎骨動脈等であった。

III 結 果

1. イヌ生体内血管の MFF 測定結果

MFF を測定する際、各血管には可能な限りカニューレーションを行い、内圧をモニターした。イヌでは径が 2 mm 以上の血管では全身どの血管もほぼ同じカニューレーション圧を示していたので、カニューレーションができないかまたはカニューレーションをすると血管が縮少してしまう 2 mm 以下の血管の圧を測定する時は、全身血圧のモニターとして総頸動脈 (2.8~4.0 mm ϕ) を用いた。MFF の値は全身血圧一定の時は血管径が大きくなるにしたがって増大した。大腿動脈のみは、他の血管と比較して径の割に例外的に高い MFF 値を示していた。全身血圧を変化させた時、カニューレーション圧と MFF とは直線的な比例関係にあった。血管径が細ければ勾配は緩やかであり、径が大きくなると急峻になる (Fig. 3)。

1 本の血管について血圧の変化に伴う血管径の変化をみると、血圧が高くなるほど径が大きくなる傾向にはあったが、必ずしも一定の関係は得られず、その変動幅は最高血圧 50 mmHg から 300 mmHg の間では $\pm 14\%$ であった。

Fig. 3 にて血圧 50 mmHg, 100 mmHg, 150 mmHg のときの MFF と多数の血管での血管径との関係を見ると、両者の間にはほぼ直線的な比例関係がみられた。

Fig. 3 Relationship between systemic blood pressure measured in common carotid by cannulation method and "MFF" measured in various sized arteries of 3 dogs (solid, thin dotted and thick dotted lines). Numbers next each line indicate outer diameter of arteries. Systemic blood pressure was controlled by iv. drip of Neosinephrine, Nitroprusside and Arfonad. 5.7*, 3.6*, and 3.5 mm*: femoral arteries of each dog, whose "MFF" are exclusively higher value than other arteries in the same size.

2. ヒト剖検脳の摘出血管に静水圧をかけた時の MFF 測定結果

生後一週間から 55 才までの 7 剖検例 27 本の脳血管について水圧と MFF との関係を見ると、すべての血管において両者は直線的な比例関係にあった (Fig. 4)。Fig. 4 で水圧 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200 mmHg の各水圧の点で各直線の MFF と血管径との関係を見ると、両者には完全な直線関係がみられた。Fig. 5 はそれを示したもので、8 本の直線の勾配をみると、各勾配は内圧に比例関係にあった。上記の関係を式で表わすと、

x: diameter of artery (mm)

y: MFF (g)

z: intraarterial pressure (mmHg)

Fig. 4 Relationship between hydrostatic pressure and "MFF" in the human cerebral arteries obtained from 7 autopsies.

"MFF" is proportional to arterial hydrostatic pressure in each artery. The slope of each line becomes steeper as increase of the diameter.

Fig. 5 Relationship between diameter of human cerebral arteries and "MFF" in the various hydrostatic pressure converted from the results of Fig. 4. With the formula, which was introduced from this graph, intraarterial BP (Z) can be calculated from diameter of artery (X) and MFF (Y) as follows,

$$Z = \left(\frac{Y + 2.2}{X - 0.38} - 1.52 \right) \times 18.2$$

とすると、Fig. 5 のグラフより

$$y = ax + b \quad \text{①}$$

の一般式が得られる。8本の直線の間では勾配aについて、

$$a = 0.055z + 1.52 \quad (r = 0.99, p < 0.01)$$

の関係が得られた。これを①式に代入すると、

$$y = (0.055z + 1.52)x + b \quad \text{②}$$

となる。一方これらの8本の直線の延長した線の集束する点(-2.2, 0.38)を原点とするならば②の式は、

$$y + 2.2 = (0.055z + 1.52)(x - 0.38)$$

となる。これより内圧zを求める式は、

$$z = \left(\frac{y + 2.2}{x - 0.38} - 1.52 \right) \times 18.2 \quad \text{③}$$

となる。上記の③式にx, yの値を代入すればzの値を求めることができる。上記の③式にx, yの具体値を代入して計算してみると、Fig. 5のグラフ上で得られた値とほぼ一致していた。以上よりMFFと血管径が分かれば血管内圧を算出できる換算式を得た。

IV ストレンゲージピンセットの臨床応用

脳動静脈奇形(A-V-M)、浅側頭動脈-中大脳動脈(STA-MCA)吻合術、脳動脈瘤および内頸動脈海綿静脈洞瘻の4疾患の12症例に本ピンセット法を応用した(Table 1)。手術中血管のMFFおよび外径を測定し、ヒト脳血管の水圧試験の換算表(Fig. 4)またはこれより得られた換算式より血管内圧を容易に算出することができた。上記の12症例の中から3例の具体例を示すと次のごとくである。

1. STA-MCA 吻合術の一例

症例7: 57才男性。主訴; 右半身麻痺および失語症。1977年4月5日某医にて痔の手術を受け、翌日めまい様の発作あり、その後失語症と右半身麻痺出現。同年4月23日入院。左頸動脈写にて左中大脳動脈起始部の閉塞を認め、同年5月17日STA-MCA吻合術施行。STAは径が2mmありMFFは8g、Fig. 4の換算表にて算出すると血管内圧は75mmHgとなる。Cortical MCAは径

Table 1 Cases of blood pressure measurement with strain gauge forceps during surgery

Case	Age	Sex	Disease	Operation	Vessels measured	Results of measurement
1	40	M	lt-MCA occlusion	STA-MCA anastomosis	STA and cortical MCA	2 times higher blood pressure in cortical MCA after anastomosis
2	63	M	lt-MCA occlusion	STA-MCA anastomosis	STA and cortical MCA	3.5 times higher blood pressure in cortical MCA after anastomosis
3	48	F	lt-MCA occlusion	STA-MCA anastomosis	STA and cortical MCA	2 times higher blood pressure in cortical MCA after anastomosis
4	57	M	lt-MCA occlusion	STA-MCA anastomosis	STA and cortical MCA	4 times higher blood pressure in cortical MCA after anastomosis
5	63	F	lt-MCA aneurysm	clipping of aneurysm neck	MCA	Blood pressure 180 mmHg in M ₂ portion after clipping
6	41	M	small AVM in rt-Cbll	extirpation of AVM	draining vessel	No change in blood pressure in draining vessel after removal of nidus
7	44	M	AVM in rt-parietal	extirpation of AVM	draining vessel	Blood pressure decreased 20% in draining vessel after removal of nidus
8	43	M	AVM in lt-temporal	extirpation of AVM	feeding vessel and draining vessel	Blood pressure decreased 55% in draining vessel after removal of nidus
9	34	F	AVM in rt-frontal	extirpation of AVM	feeding vessel and draining vessel	Blood pressure decreased 70% in draining vessel after removal of nidus
10	35	F	AVM in lt-frontal	extirpation of AVM	draining vessel	Blood pressure decreased 75% in draining vessel after removal of nidus
11	39	M	AVM in lt-parieto-occipital	extirpation of AVM	feeding vessel and draining vessel	Blood pressure decreased 62% after removal of nidus
12	17	M	rt-carotid cavernous sinus fistula	trapping of fistula	intracranial C ₂ portion	5.5 times higher blood pressure obtained in C ₂ portion after clipping of C ₃ portion

が1 mmでMFFを換算すると25 mmHgであった。血管吻合後はcortical MCAは換算値で60 mmHgに上昇しており、圧は2倍強に増加していた。これにより吻合術による効果は良好と判断した。吻合後のSTAの圧は65 mmHgとわずかに下降していた。術後血管写でも血行は良好であった。臨床症状の改善もみられた (Fig. 6A)。

2. 左内頸動脈海綿静脈洞瘻の一例

症例12: 17才男性。主訴: 眼球突出および視力障害。1976年2月6日オートバイにて走行中、自動車と衝突。約24時間意識障害あり、2~3日後より右眼痛出現。右内頸動脈海綿静脈洞瘻の診断をうけ、同年6月26日頸部からの筋肉片による右内頸動脈の閉塞術を受けたが、筋肉片は動静脈瘻より心臓側のC₆の部分にて止まり、なお瘻へは対側からの逆行性血流があった。その後も症状

が続き当科へ転医した。同年10月18日開頭術による瘻のtrappingを行った。頭蓋内内頸動脈より眼動脈が分枝するすぐ中枢側にてclippingを行った。Clipping前の内頸動脈は径が3.4 mmであり、静脈のように軟らかく拍動も小さく、MFFの換算値も低く30 mmHgであった。Clipping後はclipより末梢側の内頸動脈は径が5 mmに増加しており、拍動もはっきりと現れてきた。MFFを測定すると160 mmHgとなり、clipping前の約5倍強に上昇していた。この結果からみるとclipping前は内頸動脈へ逆流してきた血流はただちに瘻へ引かれるため、内頸動脈にとっては血流抵抗がほとんどなくなり、静脈とまったく同様な血流動態であったと考えられる。この圧測定の結果によりclippingの効果は良好と判断しえた。術後は経過良好にて眼症状も軽快した (Fig. 6B)。

Fig. 6 A: Records obtained by strain gauge forceps during STA-MCA-anastomosis in case 7. Top: Records of "MFF" in superficial temporal artery before and after anastomosis. Bottom: Records of "MFF" in a cortical branch of the middle cerebral artery before and after anastomosis. B: Records obtained during trapping of Carotid Cavernous Sinus Fistula in case 12, who was previously undergone obstruction with muscle plugs in C₅ portion. Left column: Records of "MFF" in C₂ portion of carotid artery before clipping. Right column: Records of "MFF" in the same C₂ portion after clipping of C₃ portion. After trapping of fistula the blood pressure of intracranial carotid artery increased 5.5 times more than before trapping.

3. 脳動静脈奇形の一例

症例8：43才男性。主訴：頭痛および左下肢麻痺。

1977年5月13日夕方トイレへ行く途中左下肢の脱力をきたし転倒、引き続き嘔気および項部痛あり、5月16日入院。脳血管写にて左側頭葉動静脈奇形と診断し、同年6月9日開頭術施行。剔出前は流入血管は径が2.8mmあり、MFFの換算値は80 mmHgであり、流出血管は径が2 mmありMFFの換算値は30mmHg。流入血管閉鎖後は流出血管のMFF換算値は15 mmHgに減少していた。術中流出血管圧を計測していると、流入血管のすべてが閉鎖された時に始めて流出血管圧が低下する (Fig. 7)。

V 考 察

動物実験のみならず、臨床で特に脳血管手術の際手術野内の血管の血圧変化を非観血的に測定することは多くの利点があり、多くの人たちが望んでいたことである。我々の考案したストレンゲージピンセットによる血圧測定は、この目的をおおいに満足させるものと思われる。手術中に脳の血流動態を知る方法として、細血管でも測定できる小型化された電磁血流計⁶⁾があり、径1 mmの血管の血流量が測定されている。この方法は非観血的で血管に損傷を与えないが、血流計のヘッドで脳組織を損傷する恐れがある。我々のストレンゲージピンセットでは、ピンセットの先で挟む間隔のみ血管を露出すればよ

Fig. 7 Records obtained from main draining vein during the total removal of AVM before and after obstructive procedure of the feeding arteries in case 8. The decreased “MFF” of the draining vein after obstruction of several feeders indicates efficient obstruction of all feeders.

く、周囲組織への損傷も少なくはるかに手軽に扱うことができる。視血的な血圧測定法としては種々試みられており、22ゲージの穿刺針²¹⁾ または直径1.3 mmの圧力センサー²²⁾ も開発されているが、血管壁に損傷を与えるという点で問題がある。

本ピンセットで血圧を測定するために、ヒト剖検時の脳血管の水圧試験の結果を血圧の換算表として使用し、症例の血圧換算はこの表で行ったが、その後この結果を統計処理して血管内圧を算出する換算式が得られた。この式に症例の具体例を代入して圧を求めると換算表で得られた値とほぼ一致していた。Fig. 5に見られるように径1 mm前後の部分に換算式の直線が集束しているため、MFFのg数の少しの誤差が内圧算出で式で行えば大きな誤差となることは考えられる。このため1 mm以下の血管内圧測定上の誤差を少なくするため、高感度の細動脈専用ストレンゲージピンセットを製作中である。

換算式による測定誤差をみるため、Fig. 5で求められた各直線の一標準偏差値をMFFのg数で求め、この値をFig. 4のデータに代入して各水圧時の一標準偏差値に対する内圧の変化幅を求め、この変化幅を誤差として算術平均を求めると誤差は±10%以下となった。この換算式は血管の水圧試験から求めたものであるため、実際の生体内の血圧との差の有無を検討するため、STA-MCA吻合術の際実際に血管にカニューレーションを行い圧を測定してみた。生体内での血管内圧は換算式で求めた圧よりも約25%低かった。したがって換算式で得られた

圧から25%減じたものが、生体内での血管内圧を表わすものと思われる。ヒトの脳血管の水圧試験から得られた換算式に上記の点を考慮して補正を行うと③式は、

$$z = \left(\frac{y + 2.2}{x - 0.38} - 1.52 \right) \times 18.2 \times 0.75 \dots ④$$

となる。この④式に臨床例を応用すると実際のカニューレーション圧とほぼ一致した。今後なお症例を重ねてこの換算式から得られた血圧と、生体内カニューレーションで得られた血圧とを比較検討していきたい。

ヒトの脳血管の水圧試験の結果からみる限り、老年者も若年者も血管径が同じならばほぼ同じ結果が得られた。この点について、脳の血管壁は中膜、外膜が薄く、壁全体としても薄い²³⁾ ため、血管径のみがMFF測定に関与しているように見え、部位による壁の厚さの差は無視できるのであろう。しかし腎腫瘍の一例のみは血管径の割に高いMFFを示しており、組織像をみるとアテローム変性を伴った明らかな動脈硬化像がみられた。病的血管については現在研究中である。

記録紙にてMFFを測定する際、血管の拍動が消失した点を読みとっているが、この拍動の記録にも先のとがったもの、先の丸いもの等がみられた。心臓の拍出力、静脈環流等により圧力脈波も変化している²⁴⁾ ので、この影響が個々の拍動の波形に加わっている可能性もあり、記録を読みとる上で注意を要すると思われる。

ストレンゲージピンセットを臨床例に応用することの長所として、血管に損傷を与えることなく簡単に血管内圧が測定でき、それによって手術効果を即座に判定できるという点である。すなわちSTA-MCA吻合術の際、吻合後のcortical MCAの圧の上昇をその場で確認し手術効果を判定できること。脳動静脈奇形の手術の際には流入、流出血管の判別のほか、流出血管の圧の下降を知ることによって流入血管の閉鎖された程度を推測しうる。内頸動脈海綿静脈洞瘻の手術の際、内頸動脈の圧は予想外に低くなっており、内頸動脈clipping後はC₁部で圧は著明に上昇して脳循環に好影響を与えたであろうことを知れたことなどである。

VI まとめ

1. 脳血管手術中、局所血管の内圧の絶対値をストレンゲージピンセットで測定できることを確かめた。
2. 動物実験により最高ピンセット圧“MFF”と血管径がわかれば血管内圧の絶対値を算出できることを確かめた。
3. ヒト剖検時の脳血管を摘出し、水圧をかけて最高

ピンセット圧“MFF”を測定した結果、老年者も若年者も血管径が同じならば同じ結果であることが判明した。

4. ヒト脳血管の水圧試験の結果から、最高ピンセット圧と血管径がわかれば血管内圧を算出できる換算式を得ることができた。

5. 実験結果に基づき臨床応用を行い、STA-MCA吻合術、脳動静脈奇形、脳動脈瘤、内頸動脈海綿静脈洞瘻の手術効果を即座に判定できた。

稿を終るにあたり名古屋大学剖検センター平林紀男、飯田市立病院瀬口喬士、豊橋市民病院岡村和彦、名古屋第二赤十字病院新谷 彬、市立四日市病院坂野達雄、安城更生病院広田敏行、大垣市民病院井口郁三および教室の林雄一郎、鈴木善男、六鹿直視の諸先生方の御協力に深謝致します。

本研究は厚生省脳脊髄血管異常調査研究班研究費の援助を受けた。装置の製作は東海理化電気製作所（愛知県新川町）による。

本論文の要旨は昭和52年10月29日、第36回日本脳神経外科学会総会および昭和53年4月2日、第55回日本生理学会大会にて発表した。

文 献

- 1) FERGUSON, G.: Direct measurement of mean and pulsatile blood pressure at operation in human intracranial saccular aneurysms. *J Neurosurg* 36: 560-563, 1972
- 2) Millar Instruments, Inc. カタログ
- 3) 森竹浩三, 半田 肇, 林紘三郎, 佐藤正明: 脳動脈瘤に関する実験的研究(第1報)力学的にみた脳動脈瘤壁組織構築と実験的動脈瘤. 脳外1: 115-123, 1973
- 4) 重井達朗: 血圧曲線の解釈に関する2, 3の問題. 呼吸と循環6: 303-312, 1958
- 5) SPETZLER, R. & CHATER, N.: Microvascular bypass surgery. *J Neurosurg* 45: 508-513, 1976
- 6) 杉田虔一郎, 水谷哲郎, 林雄一郎, 鈴木善男, 六鹿直視, 広田敏行, 景山直樹: ストレンゲージピンセットによる脳血管非観血的血圧測定法. *Neurol Med Chir* 17: 399-404, 1977