

## 動脈系の種々の場所の脈波速度について

## Segmental pulse wave velocity

平井 昭  
山崎 茂  
福島 一也  
小沢 俊  
宿谷 正毅  
増田 善昭  
稲垣 義明

Akira HIRAI  
Shigeru YAMAZAKI  
Kazuya FUKUSHIMA  
Shun OZAWA  
Masaki SHUKUYA  
Yoshiaki MASUDA  
Yoshiaki INAGAKI

### Summary

Central (carotid-femoral) and peripheral (carotid-brachial, brachial-radial, radial-finger, femoral-dorsalis pedis, dorsalis pedis-toe) arterial PWVs were determined in 126 patients of which 72 were normotensive and remaining 54, hypertensive.

1) PWV increased in the course of transmission toward periphery, but it decreased abruptly in finger and toe arterial regions.

2) PWV in the central arteries increased significantly with age and the elevation of mean arterial blood pressure, while no tendency was found in the peripheral arteries. Correlation between PWV and age was even negative in the arteries of the extremity ends.

The reason for the difference in central and peripheral PWV was discussed.

### Key words

transmission of arterial pulse wave  
central pulse wave velocity (PWV)  
peripheral PWV  
parameters of PWV

### はじめに

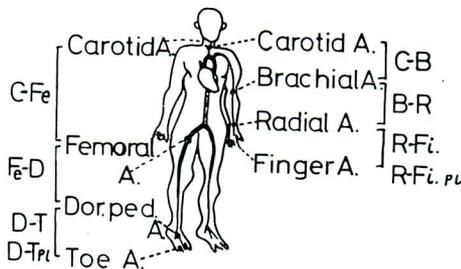
近年、動脈硬化、または弾性管の指標として動脈系の脈波速度が用いられることが多くなってきた。そのうち、大動脈系の中樞脈波速度については比較的研究も多く、<sup>1)~4)</sup> その生理学的意義も確立されてきているが、それより末梢動脈部、およ

び、指尖部の脈波速度<sup>2)5)</sup>の検討は、十分であるとはいえない。しかし、末梢の脈波速度は、その実施がより容易なため、かえって臨床的に多用される傾向があり、それをもって中樞の、あるいは、動脈系全体の硬化度の指標に用いたりする誤りがおこり易いのも事実である。

そこで, 今回われわれは, 中枢と末梢の脈波速度を同時に測定し, 両者の年齢, 血圧などに対する態度, あるいは, 相互の関係をしらべ, その差異を明確にして脈波速度を評価するさいの参考に供したいと思う。

**対象と方法**

対象は16才から80才までの126人で, これに安静仰臥位で頸動脈, 上腕動脈, 橈骨動脈, 手の指動脈, 大腿動脈, 足脊動脈, 足の指動脈の各脈波を記録し, 頸動脈—上腕動脈 (C-B), 上腕動脈—橈骨動脈 (B-R), 橈骨動脈—指動脈 (R-Fi または R-Fi pl), 頸動脈—大腿動脈 (C-Fe), 大腿動脈—足脊動脈 (Fe-D), 足脊動脈—趾動脈 (D-T または D-T pl) における脈波速度を測定 (Figure 1) した。脈波の記録には Infraton 脈波計を使用し, 指尖容積脈波はフクダ電子製二段較正式光電式脈波計 PT-703 を使用し, いずれもシーメンス社製カルジレックス6記録器に接続し, 心電図, 心音図とともに紙送り速度10cm/secで記録した。なお, 指動脈脈波と指尖容積脈波は, 同一部位, 主として左第2指の爪下部で採取した。また, 脈波速度の算定は, 脈波採取部位間の距離 (l) を脈波上昇脚の下1/5の点における両脈波の時間差 ( $\Delta T$ ) で割っておこなった。すなわち, 脈波速度 (PWV) =  $l / \Delta T$  (cm/sec)。このように



**Figure 1. Measurement of segmental PWV**

Noninvasive pulse wave recordings were performed in carotid, brachial, radial, finger, femoral, dorsalis pedis and toe arteries (pl: plethysmography).

PWVs were measured as follows.  $PWV = l / \Delta T$  (l: distance of two arteries.  $\Delta T$ : time difference of two pulse waves.)

して得た各動脈部の脈波速度は, 対象をまず心疾患のない尋常血圧群と高血圧群に分け, ついで各群を若年 (~29才), 中年 (30~59才), 老年群 (60才~) に3分してそれぞれにおける各脈波速度の平均値, 標準偏差などを算出した。さらに, 年齢, 血圧などの Parameter に対する相関を各脈波速度について検討し, また, 大動脈系脈波速度 (C-Fe) とその他の末梢脈波速度との相関をしらべた。

**成績**

1. **segmental pulse wave velocity** (Table 1). Table 1 にみるように, 尋常血圧群, 高血圧群, いずれにおいても, 脈波速度は中枢動脈部 (C-Fe) から四肢動脈部 (B-R, Fe-D) にすすむにつれ増大するが, 手, および, 足の指動脈部 (R-Fi (pl), D-T pl) になると急激に減少する。また, 尋常血圧群では, 中枢から橈骨動脈, あるいは, 足脊動脈部までは高令者の方が脈波速度がより大になっているが, 指, または, 趾動脈部ではこの関係が逆転して高令者の方がかえって脈波速度がおそく

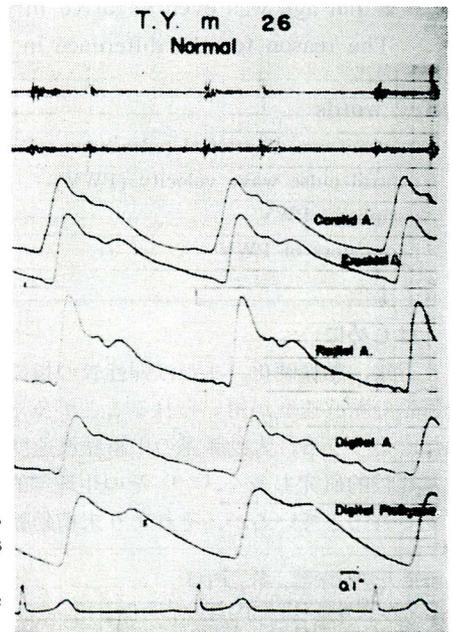


Table 1. Segmental pulse wave velocity

	N	Ps (mm/ gH)	Pd	age	PR/min	PWV(cm/sec)								
						carotid- femoral	carotid- brachial	brach.- radial	radial- finger	radial- fingerpl.	femoral- dor.ped.	dor.ped.- top	dor.ped.- toe pl.	
Normotension	young	35	118.5 ±10.3	69.2 ±8.4	23.1 ±3.7	64.8 ±8.7	545.6 ±54.5	560.5 ±89.3	1266.9 ±454.8	658.4 ±264.5	562.2 ±183.9	774.5 ±132.1	578.2 ±216.6	383.7 ±170.7
	mid-age	25	117.8 ±11.0	74.1 ±8.5	40.5 ±7.9	68.9 ±9.1	633.0 ±92.7	655.3 ±153.1	1107.3 ±231.2	636.3 ±188.9	490.2 ±171.7	813.5 ±93.6	264.5 ±48.5	345.9 ±110.9
	Old	12	129.5 ±15.3	77.8 ±11.3	68.3 ±6.8	74.0 ±11.8	795.2 ±108.5	753.6 ±202.0	1382.9 ±581.5	487.0 ±207.6	404.7 ±102.9	1036.1 ±286.4	203.0 ±74.7	291.6 ±116.7
Hypertension	young	6	169.2 ±21.2	99.3 ±11.7	24.2 ±2.9	70.5 ±11.0	759.0 ±164.6	698.0 ±93.3	1602.3 ±508.9	681.5 ±19.9	505.6 ±94.4	816	—	353
	mid-age	26	169.6 ±23.0	101.8 ±13.5	47.1 ±8.6	66.4 ±13.4	894.2 ±141.0	847.4 ±223.4	1509 ±680.3	625.2 ±267.7	441.5 ±171.9	1030.3 ±174.1	440.5 ±147.4	281.6 ±85.7
	Old	22	178.9 ±20.6	91.2 ±13.3	67.2 ±5.3	64.3 ±10.9	1137.8 ±215.0	800.4 ±180.9	1402.2 ±564.7	456 ±160.3	382.0 ±144.4	1005.1 ±128.1	438.5 ±123.1	276.4 ±99.4

Central and peripheral PWVs were determined in 126 patients of which 72 were normotensive and 54, hypertensive.

PWV increased in the course of transmission toward periphery, but it decreased abruptly in the arteries of the extremity ends.

なっている。高血圧群では、老年群がもっともはやい脈波速度を示すのは中枢動脈部だけであり、指、または、趾動脈部では若年群が、その中間の末梢動脈部では、中年、または、若年群が脈波速度の大きな傾向がある。

2. 年令と各脈波速度の関係 (Figure 2, 3).  
 血圧をできるだけ一定にするため尋常血圧群をえらび、年令を横軸に、各脈波速度を縦軸にとって相互の相関をしらべた。Figure 2上段の中枢(頸動脈—大腿動脈)脈波速度は、加令とともに増大し、 $r=0.743$  とかなりの正相関がある。大腿動脈—足脊動脈 (Figure 2B), 頸動脈—上腕動脈 (Figure 3A) においては、脈波速度は年令と軽度の正相関があるが、上腕動脈—橈骨動脈 (Figure 3C) ではほとんど相関がなく、指動脈 (Figure 3B), 趾動脈 (Figure 2C) ではむしろ負の相関がみと

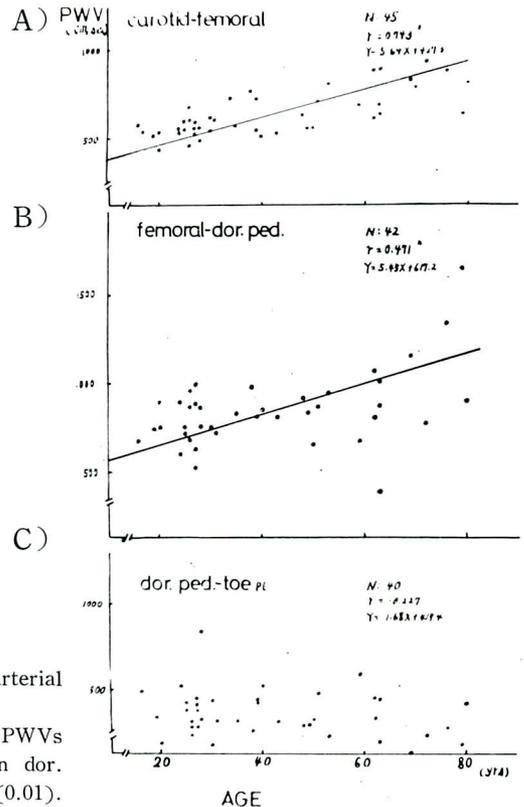


Figure 2. Age and PWV in normotensives (1) (carotid-femoral, femoral-dor. ped. and ped. -toe pl. arterial PWV)

Carotid-femoral and femoral-dor. ped. arterial PWVs increased with age, while no tendency was found in dor. ped. -toe pl. arterial PWV (\*statistically significant,  $p<0.01$ ).

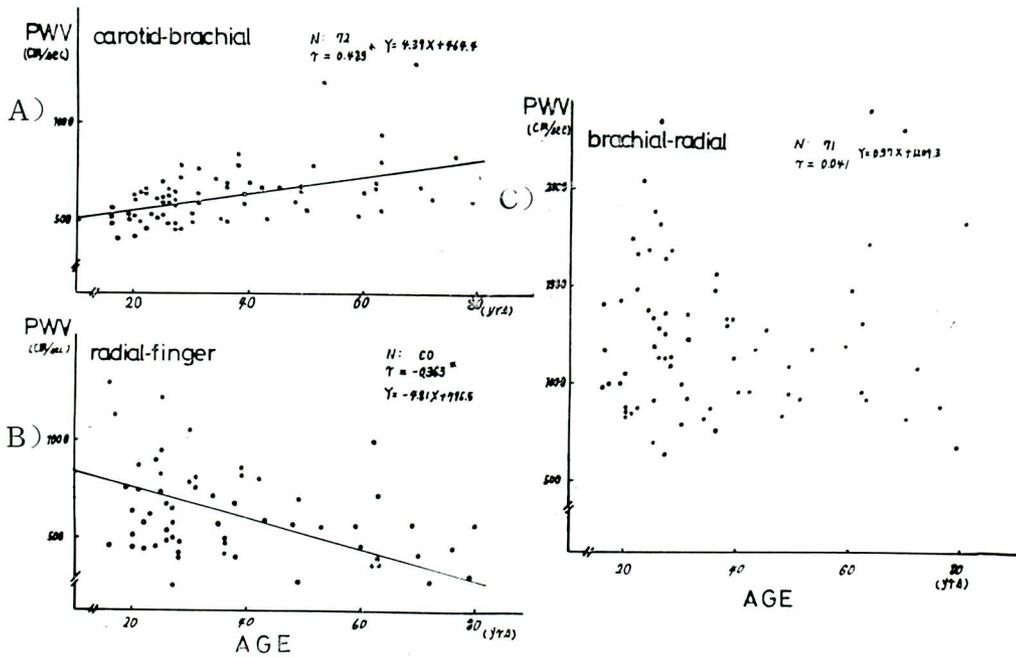


Figure 3. Age and PWV in normotensives (2) (carotid-brachial, brachial-radial and radial-finger arterial PWV)

No correlation was found in brachial-radial arterial PWV with age. In radial-finger arterial PWV even slight negative correlation was found.

められる。

3. 血圧と各脈波速度の関係 (Figure 4, 5).

Figure 4 は, 中枢脈波速度と平均血圧との関係を年齢別にみたものであるが, 若年, 中年, 老年群のいずれでも脈波速度は平均血圧に比例して増大する。しかし, 老年群の相関はごく低い。一方, 末梢動脈部では, 若年群の頸動脈—上腕動脈, 中年群の大腿動脈—足背動脈をのぞいては脈波速度と平均血圧の相関は統計学的にみられなかった。

4. 中枢と末梢の脈波速度 (Figure 6), 尋常

血圧群において, 中枢の脈波速度と末梢各脈波速度との関係をしらべた。上肢脈速度のうち頸動脈—上腕動脈脈波速度 (Figure 6A) は,  $r = 0.525$ と多少の相関を示すが, 上腕動脈—橈骨動脈 (Figure 6B), 橈骨動脈—指動脈脈波速度 (Figure 6C) は, 中枢脈波速度とほとんど相関を示さない。下肢末梢脈波速度でも同様の態度がみられた。

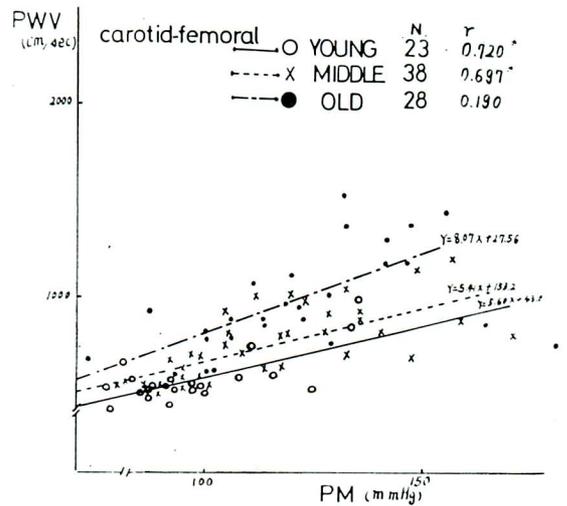


Figure 4. Mean arterial blood pressure (Pm) and central PWV increased with the elevation of Pm, but in older patients correlation is not significant.

(\* : statistically significant).

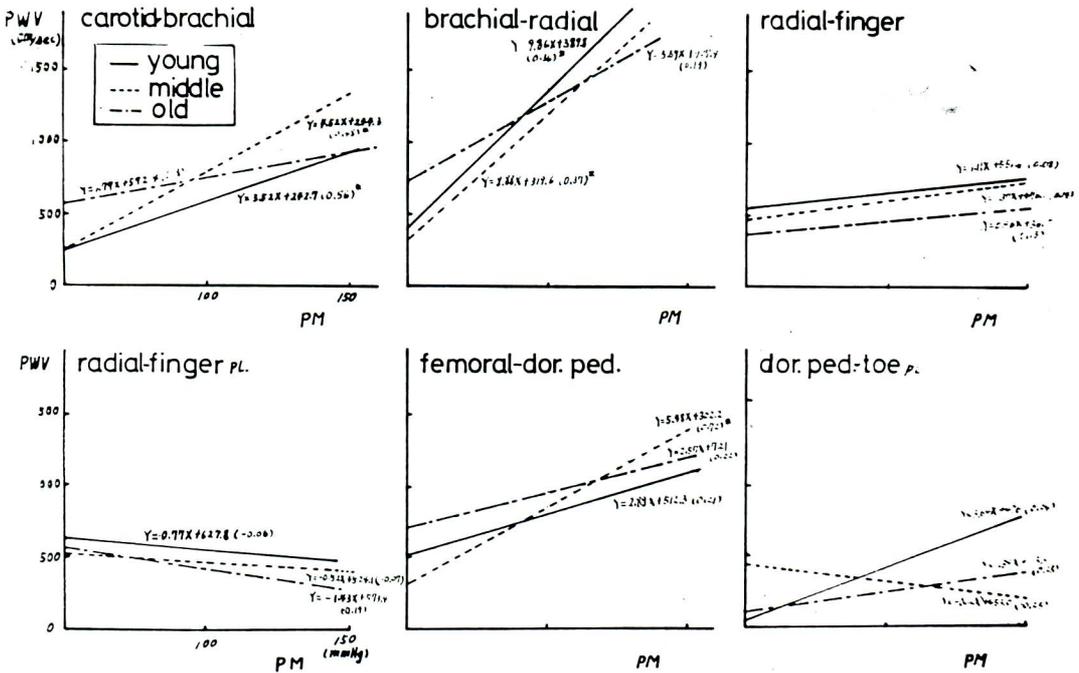


Figure 5. Pm and peripheral PWVs, especially referred to the age  
 Almost no correlation was found between Pm and peripheral PWV (\* statistically significant).

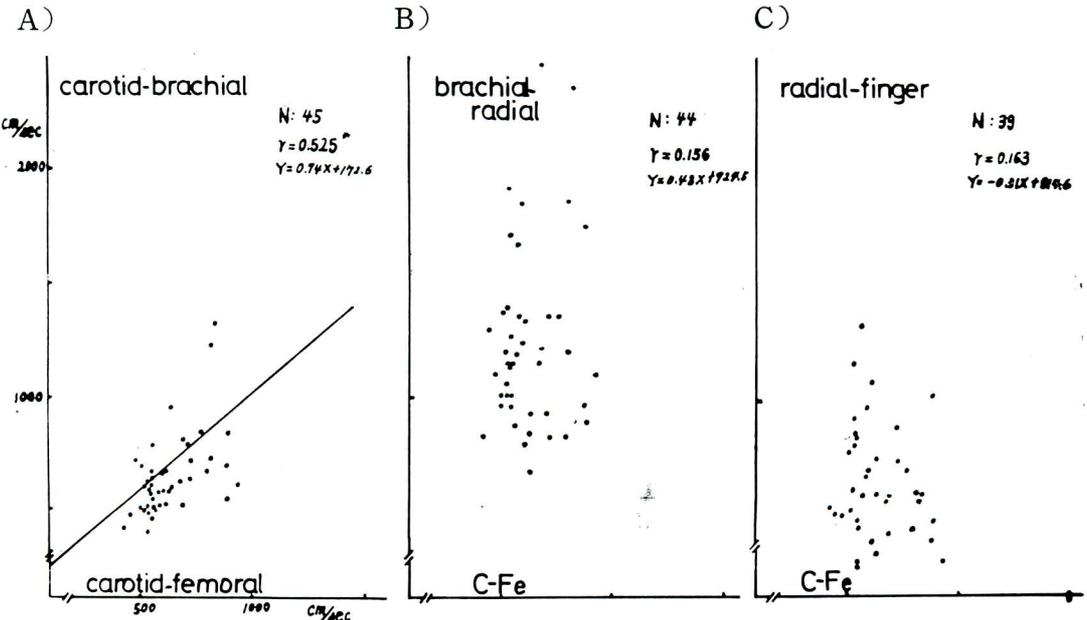


Figure 6. Correlation between central and peripheral PWV in normotensives  
 Except for carotid-brachial arterial PWV no significant correlation was found with central PWV (\*statistically significant).

以上の成績をまとめると①脈波速度は末梢にいくにつれ増大するが、指、または、趾動脈部になると急激に減少する、②末梢脈波速度は、中枢のそれとくらべ、年齢、血圧などの Parameter との相関が低く、とくに、指、または、趾動脈部の脈波速度は年齢に対し逆相関を示す傾向がある。

考案

一般に、脈波は中枢から末梢へ伝搬するにつれ、進行速度が早くなる<sup>25)</sup>といわれる。Figure 7(1)式は、Moens-Korteweg の古典的な脈波速度の式で、PWV<sub>0</sub>は弾性管を進む脈波速度、Et は管壁の折線方向への弾性率、h は管壁の厚さ、ρ は血液の密度、Rm は外径と内径を平均した脈管の平均半径を示す。すなわち、この式は、管壁の厚さと平均半径の比が脈波速度に大きな影響を与えていることをあらわしている。また、Burton<sup>6)</sup>によれば、大動脈や中等大の動脈にくらべ小動脈、細動脈では h/Rm が著しく増大する (Figure 7, Table) とされ、これにより末梢動脈の脈波速度増大一少なくとも橈骨動脈、足背動脈あたりまでの一は説明できるように思われる。しかし、これではさらに末梢部の指、または、趾動脈における脈

$$PWV_0 = \sqrt{\frac{Et h}{2\rho Rm}} \dots\dots\dots(1)$$

(Moens-Korteweg)

Et : Young's modulus      ρ : density of blood  
h : wall thickness      Rm : mean radius

	Ri cm	h cm	Rm cm	h/Rm
Aorta	1.3	0.2	1.4	0.14
Middle Art.	0.2	2 × 10 <sup>-2</sup>	0.21	0.10
Arteriolen	1.5 × 10 <sup>-3</sup>	2 × 10 <sup>-3</sup>	2.5 × 10 <sup>-3</sup>	0.8
Capillaren	4 × 10 <sup>-4</sup>	1 × 10 <sup>-4</sup>	4.5 × 10 <sup>-4</sup>	0.22

Burton 1954

Figure 7. Upper : PWV-formula by Moens and Korteweg (1878)

It indicates that h/Rm influences the increase in PWV. LOWER : h/Rm increases in the course of the artery toward periphery (Burton 1954).

波速度の減少は説明できない。(これに対して Hanck<sup>7)</sup>(1938)は、末梢の細動脈壁における脈管の伸展性の増大に、また、Greven<sup>8)</sup>(1939)は、血流の管壁に対する抵抗に注目しているが、はっきりした説明は現在までなされていない。)

Figure 8 は、反射のない粘弾性管を血液が流れる時、その流体の粘性摩擦を考慮に入れた脈波の位相速度 PWVph と反射のない弾性管を粘性のない完全流体が流れるさいの PWVo の比が Womersley の α に関係することを示す。<sup>9)</sup>そして α が 2 以下になると流体摩擦の影響が急激に増大し、脈波速度が減少することを示している。なお、α は Figure 8 (2)式に示すように、脈管内半径 (Ri)、周波数 (ω)、血液の密度 (ρ)、液体の粘性係数 (μ) に関する dimension のない parameter である。これらの α を決定する変数のうち、最も変りうるのは Ri と思われるので、(2)式は、脈管内径がある数値以下になると α が減少し、脈波速度は血液粘性の影響をうけて減少することを示している。これを実際の動脈系にあてはめてみると、脈管内半径が 0.4mm のとき—ρ=1.06g/ml, μ

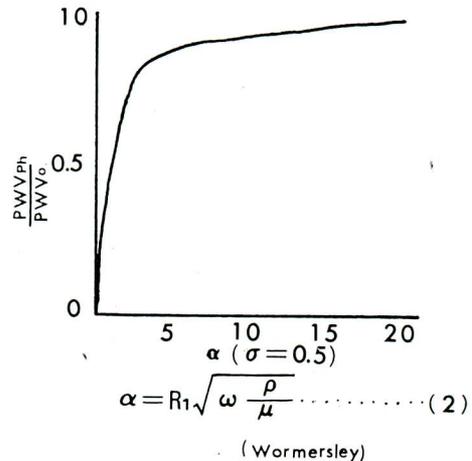


Figure 8. Relation PWVph/PWVo as function of α (Womersley)

(Ri: internal radius of blood vessel, ω: angular frequency, ρ: density of blood, μ: modulus of blood viscosity).

Decrease in Ri in small arteries implies the significant influence in PWV.

$=0.04$  poise,  $\omega=1/\text{min}$  として $-\alpha$ は、ほぼ 2.0 となり、これ以下の内径をもつ動脈、すなわち指動脈などでは、脈波速度が流体粘性の影響により著明に減少することが考えられる。

次に、末梢脈波速度を考えるうえで注意しなければならないのは、その機能的変動性が大であることである。末梢の脈波速度は中枢のそれに比べ、血圧、年齢などの parameter に対するばらつきが大きく、相関が低いこと、また、頸動脈—上腕動脈部をのぞいては、中枢脈波速度とほとんど相関しないのはすでに述べた通りであるが、上肢を挙上、ついで下垂したときの上腕動脈—橈骨動脈脈波速度の変動範囲をしらべてみると、かような手技のさいの上腕動脈の平均血圧の変動は 20% にすぎないのに、上記脈波速度の変動は 80% 以上（若年者）にもおよび、末梢脈波速度の機能的変動性の大きさをうかがわせる。<sup>10)</sup> これは、中枢動脈が弾性動脈であるのに対し、末梢の中・小動脈が主として筋性動脈であり、動脈壁の性状がその平滑筋の収縮状態如何により大きく変動する<sup>5)</sup> のが主な原因と思われる。したがって、動脈系全体の硬化度の指標として上肢、または下肢の末梢動脈脈波速度を用いるのは — それは、機能的硬化を含めた末梢動脈壁の真の状態を指し示しているのかもしれないが — きわめて慎重にすべきである。

以上、脈波速度は動脈の部位により、それぞれ特徴的な変化態度を示し、それらは決して同一に論じられぬことを述べ、その理由につき 2, 3 の

考察を加えた。

#### 文 献

- 1) Wezler KU, Böger A: Die Dynamik des arteriellen Systems. Der arterielle Blutdruck und sein Komponenten. *Ergeb Physiol* **41**: 292-606, 1939
- 2) 平井 昭: 面積脈波の基礎的検討, および、脈波速度の臨床的観察. *千葉医会誌* **43**: 507-538, 1967
- 3) Karnbaum S: Elastität und Morphologie des Aortenwindkessels beim Bluthochdruck. *Arch Kreislaufforschg* **34**: 18-74, 1961
- 4) Schimmler W: Correlation between the pulse wave velocity in the aortic iliac vessel and age, sex and blood pressure. *Angiology* **17**: 314-322, 1966
- 5) Zangeneh MU, Nasserelami H: Das Verhalten der Pulswellengeschwindigkeit im Bein in Abhängigkeit von Lebensalter und Geschlecht. *Z. Kreislaufforschg* **56**: 368-374, 1967
- 6) Burton AC: *Physiology and Biophysiology of the Circulation*. p78, Year Book Med Publ, Chicago, 1965
- 7) Matthers K, Gross FU, Göpfert H: Untersuchungen über die Form des peripheren Pulses beim Menschen. *Pflügers Arch ges Physiol* **242**: 437-449, 1939
- 8) Greven KU, Federschmidt H: Untersuchungen zur Hämodynamik der kleineren und kleinsten Arterien. *Pflügers Arch ges Physiol* **242**: 617-643, 1939
- 9) 岡 小天: レオロジー, 391-396, 裳華房, 1974, 東京.
- 10) 平井 昭ほか: 肢立による末梢脈波の変化について. *脈波* **2**: 17-22, 1972

#### 討 論 (司会: 稲垣義明)

司会: 質問がないようですので、私から、八百長になってしまうのですけれども、ちょっと質問させてください。うちの教室では脈波速度の立ち上がり点をとってなくて、その高さの 5 分の 1 の点をとっているわけですが、その立ち上がりをとった場合と、5 分の 1 の点をとった場合との相違とか、なぜそういうようにしたかというよ

うなことをちょっと説明してください。

演者(平井): 脈波速度を測定するさい、2 つの脈波間の時間的差 ( $\Delta T$ ) を出すのに、脈波上昇脚のどの部分をとって計測したらよいかは、多少問題になる点があります。脈波の立ち上がり点をとって脈波速度を算出し、その値と diastolic pressure との相関をみるというような報告も多い

ようですが, われわれは Frank の変法にしたがって, 脈波上昇脚の下1/5の点をとっています. それは協同研究者増田が指摘しているように, 頸動脈脈波の前に Vorwelle と称せられる小隆起があって上昇脚の立ち上がり部分に重なってくるものがあったり, 指尖容積脈波などでは, 基線の動揺が著しいことがあったりして, 脈波の立ち上がり点の判別が必ずしも容易ではなく, 誤差を生じやすいことを考慮したためであります.

この点について検討したもののスライドがありますので, 出していただきます(スライド説明).

これは, 頸動脈脈波と大腿動脈脈波の上昇脚を10等分し, 各対応点の時間差( $\Delta T$ )を比較したものです. すると, 尋常血圧群では,  $\Delta T$ は, 上昇脚のどの点をとってもほとんど差がありませんが, 高血圧群では, 頸動脈脈波の tidal wave が著明化し, 晩発性縮期性隆起(spätsystolischer Buckel)という隆起を生じるようになります.

すなわち, 主峰が非常におくてきまして, 上昇脚の上方に行くにつれ $\Delta T$ が短縮します. しかし, 立ち上がりから下1/5の点ぐらいまでは,  $\Delta T$ にはほとんど差がないように思います.

司会: もしもご質問がなければ, ということで, ちょっと用意しておいたわけなんですけれども, そういうことできれいな波形だったら, 下5分の1をとっても, それから立ち上がりをとっても, そんなに差がないということですね.

田中(東北大抗酸菌研): 1つお教え願いたいのですが, 圧力脈波と容積脈波を同時にとっておられて, それで末梢のほうの議論をされておられるのでしょうか. その辺がちょっと気になりますが, それでいいのかどうかという点が1つ疑問です. もう1つは血流速度との関係は流速脈波だかどうかという点, ちょっといま感じたものですから, もしその辺について何か実験的なことをなさっておられるようでしたら, ちょっとお教え願いたいと思ひまして.

演者: ちょっとことばが足りなかったと思ひますけれども, 容積脈波を併用しているのは指先だ

けでございます. つまり, 橈骨動脈, および, 足背動脈より末梢の指, 趾動脈部の脈波は, インフラトーンによる圧力脈波と指尖容積脈波の両方をとっています. したがって, 多少性質のちがう脈波速度が2通りできる訳です.

田中: わかりました. 先生のほうではドプラーなんか使いました流速脈波のほうはやっておれませんか.

演者: 血流波と脈波の比較というのは実験的には現在のところまだやっております. 文献でみますと, 頸動脈波のいわゆる上昇脚の肩というのは, 流速と非常に関係があるのじゃなかとというようなことがいわれておりますけれども, まだ現在ではやっております.

田中: 松尾先生のところで少し何かなさっていたようなことをお聞きしたのですが, いかがですか.

松尾(阪大第一内科): 私どもはドプラーで各種の血流速度を測りまして, それは一種の流速脈波とみてもいいと思うわけですが, それによりますと, いまの先生は立ち上がりの点とピークとの間の5分の1の点をとったとおっしゃいましたが, やはりその5分の1までのところまでも, かなりの流速の変化といたしますか. sclerosis と normal との間でその勾配が変わってくるということがしばしばございますので, 方法上の限界としてそういう方法をとられたと思うのですが, その前にもかなり情報が含まれているのじゃないかというような印象をもったですけれども…….

演者: その前といいますと, 5分の1の点よりも下の部分ですか.

松尾: はい. さらにその前の, はじめの加速の一番最初の部分ですね.

演者: そのとおりだと思いますけれども, 体外性にとる圧力脈波の場合には, 結局, ゼロ点というのがはきりしてないわけで, その点では定量的に非常にあいまいなわけで, 先生のおっしゃるとおりだと思っております.