



Title	頭位性めまい患者における椎骨脳底動脈系の血流動態-2D phase contrast法による検討-
Author(s)	富永, 了; 瀬尾, 徹; 石藏, 礼一 他
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1996, 56(5), p. 257-263
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/16802
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

頭位性めまい患者における椎骨脳底動脈系の血流動態

— 2D phase contrast法による検討 —

富永 了¹⁾ 瀬尾 徹²⁾
石藏 礼一¹⁾ 田渕 幸子³⁾ 中尾 宣夫¹⁾

1) 兵庫医科大学放射線医学教室 2) 同耳鼻咽喉科学教室
3) 宝塚市立病院放射線科

Quantative Flow Measurement of the Vertebro-basilar Circulation for Positional Vertigo by Using 2D Phase Contrast Technique

Satoru Tominaga¹⁾, Toru Seo²⁾, Reichi Ishikura¹⁾, Yukiko Tabuchi³⁾ and Norio Nakao¹⁾

Quantative measurements of blood flow in the vertebral and basilar arteries were obtained by the 2D phase contrast (2D PC) technique. In phantom study, flow velocity measured with 2D PC correlated well with actual flow velocity. Sixty-six patients were neurologically normal and 20 had positional vertigo due to vertebrobasilar insufficiency (VBI). Mean velocities (MV) were measured by using a transverse plane in the vertebral arteries at the level of C3 and in the basilar arteries at the level of the sella floor. Volume flow rates (VFR) were calculated as the product of MV and the area of the arteries whose diameters were measured on the basis of pixel counting in the histogram of the signal intensity profile. In the normal group, MV of the left vertebral artery and MV and VFR of the basilar artery showed significant declines as age progressed. In the vertigo group, MV and VFR of the basilar artery were significantly lower than in the normal group. It is concluded that 2D PC technique appears to be fast and easy to handle without cardiac gating to assess blood flow in vessels surrounded by bone tissues.

Research Code No. : 503.9

Key words : MR imaging, Blood flow, Vertigo

Received Jan. 6, 1995 ; revision accepted Mar. 22, 1995

1) Department of Radiology, Hyogo College of Medicine

2) Department of Otolaryngology, Hyogo College of Medicine

3) Department of Radiology, Takarazuka City Hospital

緒 言

椎骨脳底動脈系の血流動態異常とめまいとの関係は、椎骨脳底動脈血流不全症 (Vertebro-basilar insufficiency, 以下 VBI) としてその臨床的研究は古くから数多く見られ¹⁾⁻⁴⁾、また超音波ドップラー法を用いた血流動態の解析も数多く試みられている^{7), 8)}。

一方、近年のMRIの急速な進歩に伴い、MR angiographyによる非侵襲的な血管構造の描出とともに、流速測定の手法も開発され臨床に應用されはじめている。MRIによる流速測定の方法にはbolus tracking法^{12), 13)}、tagging法¹⁴⁾、phase contrast法¹⁵⁾などがある。

phase contrast法はパルスシーケンスの中に同じ振幅、同じ時間幅であるが、極性が正負異なる勾配磁場(これを速度エンコード、VENCと呼ぶ)を印加することによって、静止組織の核からの信号を相殺し、動いている核の磁化成分からその速度に比例した位相シフト量を検出し血管像を得る方法である。この双極傾斜磁場をX, Y, Zの3軸の1方向あるいは全方向にかけることによって、これらの軸に沿ったおのおの速度成分および流れの方向が求められる。また得られた位相画像上での血管像の信号強度を測定することで流速が求められる¹⁶⁾。

今回、筆者らはphase contrast法による流速測定の一手法である2D phase contrast法(以下、2D PC法)を用いて、以下の項目について検討した。

A. 2D PC法による流速測定の定量性と各種のスキャン・パラメーターがその測定精度に与える影響について検討し、最適パラメーターを決定するためのファントム実験と、生体において測定部位を決定するためのボランティアによる基礎的実験を行った。

B. 臨床への応用として、健康人における椎骨、脳底動脈の平均血流速度および平均血流量を測定し、その正常値を求めるとともに加齢による変動について検討した。

C. VBIが原因と考えられるめまい患者で椎骨、脳底動脈の平均血流速度および平均血流量を測定し、VBIの血流動態について検討した。

基礎的実験

方法

(1) ファントム実験による検討

内径が12mmのビニール管を用いてMR装置の内部を直線状に走行するように設置し、これを室外に延長して電動ポンプに接続し閉鎖循環回路を作成した。ポンプはビニール管が相当長くても定常流を保つために高出力なもの(Iwaki, LK-51VC)を使用し、さらに定常性を高めるためにポンプの出力側にエアチェンバーと入力側に背圧弁を設置した。実験に用いた流体は水道水である。実測値の測定はメスシリンダーで単位時間内に流出した水の量とビニール管の断面積より平均流速を算出した。

MR装置はGE社製SIGNA Advantage 1.5Tで、コイルはヘッドコイルとボディコイルの両方を用いた。2D PC法による撮像は、撮像断面をビニール管に対して直交するように設定し、速度エンコードをZ軸に加えて行った。流速の測定は、得られた位相画像上で管の内空全体に関心領域(ROI)を設定し、ROI内のピクセルの平均値および標準偏差(SD)を求めた。

まずビニール管内の流速を変化させ、実測値と2D PC法での測定値を比較し、本法の信頼性および精度について検討した。次にオペレーター側で設定が変更可能なパラメーターの中でTR, flip angle, 速度エンコード量(VENC), 加算回数を逐次変化させて測定値に与える影響について検討した。各パラメーターについて検討する際、他のパラメーターは固定し以下の設定値を用いた。TR 18msec, flip angle 20°, 加算回数16回, 速度エンコード量100cm/sec, スライス厚10mm, マトリックス256×128

(2) ボランティアによる検討

測定部位を決めるために、ボランティアを対象として椎骨動脈起始部から脳底動脈遠位端の間に15mm間隔で水平断面を設定し、速度エンコードをZ軸に加え繰り返し撮像した。次に、拍動による誤差を最小限に抑えるために必要な加算回数について検討するために、3人の被験者の5本の椎骨、脳底動脈について加算回数を漸増して測定した。

結果

(1) ファントム実験

ファントム実験での流速の実測値と2D PCでの測定値の関係をFig.1に示した。両者は回帰式 $Y = 0.91X + 5.32$, $r = 0.991$ ($p < 0.001$)と極めて良好な相関を示し、補正の必要はないと考えた。

Fig.2にTRを変えて撮像を行った実験結果を示す。TRの変化に対しては流速測定に与える影響は認めなかった。

Fig.3にflip angleを変えて撮像を行った実験結果を示す。flip angleが大きくなるに従って、測定値は僅かに増大する傾向が認められたが、SDの範囲内であった。

Fig.4は加算回数を変えて撮像を行った実験結果である。2D PC法で得られる流速値は撮像時間内の平均流速であるからファントム実験では加算回数が多いほどSDが小さくなり

精度の高い値が得られた。

Fig.5は速度エンコード量の設定を変化させて測定を行った結果である。速度エンコード量とは、双極傾斜磁場の2つのロープの面積(A)と重心対重心の時間間隔(T)の積で表される。使用撮像装置のプロトコールでは検出したい血管の最大流速を設定することで、プログラム上で自動的に(A)と(T)が決定される。

設定した値が真の流速よりも小さい場合、実測値とかけ離れた低い値となり、SDも著しく大きな値を示した。逆に真の流速よりも大きく設定した場合には正確な値が得られたが、極端に大きな値を設定するとSDが大きくなることが確かめられた。

(2) ボランティアによる検討

Fig.6は測定する部位を決定するための検討結果である。椎骨動脈は鎖骨下動脈から分岐し、第6頸椎より横突起孔に入る(Fig.6, slice 1-2)。第6頸椎から第2頸椎までの間は椎骨動脈は各頸椎の横突起孔内をまっすぐに上行しているため血流速度も一定している(Fig.6, slice 3-8)。第2頸椎を出た後、外側に弧を描いて上行し環椎の横突起孔を通過後、環椎上面で後内方に進み、正中に近づくにつれ急に上方へ向きを変える。このレベルでは急峻な流れの方向の変化により血流速度は急速に低下する(Fig.6, slice 9-10)。大後頭孔より頭蓋内に入ると加速し始め、左右の椎骨動脈が合流して脳底動脈になって再び安定する(Fig.6, slice 11-12)。Fig.6に示すように血流速度をグラフにすると、あたかも椎骨動脈造影の側面像に似た形になった。

Fig.7は加算回数を漸増して測定した結果である。ファントム実験とは異なり、人体の血管は拍動により常に動いているので、加算回数を32回にしても完全にバラツキをなくすことはできなかった。しかし8回以上であれば比較的安定した再現性のある値が得られた。

健常人の椎骨動脈、脳底動脈の平均血流速度、平均血流量

対象

対象は、頭痛等の症状のためにルーティン頭部MRI検査が行われた患者のうちで、以下の条件を満たす症例を選択した。すなわち、高血圧症、糖尿病、高脂血症を基礎疾患として有さず、椎骨脳底動脈領域の症状がなく、MRIにて異常所見がないか、または天幕上に小梗塞ないしは梗塞類似の高輝度信号所見を認めるが数個以内であった症例52例である。これに正常ボランティア14例を加えた計66例(年齢19-83歳、平均46.6歳、男:女=38:28)を健常群とした。

方法

前述の基礎実験に基づいて臨床例の血流測定に用いたパラメーターは、TR 18msec, TE 6.7msec, flip angle 20°, 加算回数8回, 速度エンコード量150cm/sec, スライス厚10mm, マトリックス256×128である。撮像方向は水平断面とし、速度エンコードは上下方向に設定した。測定部位

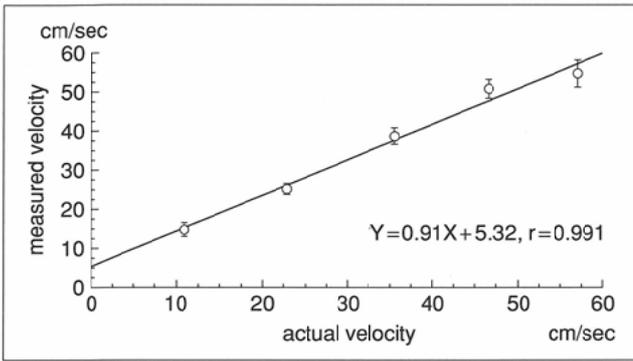


Fig.1 Flow velocities measured with 2D phase contrast are compared with actual velocities in a flow phantom.

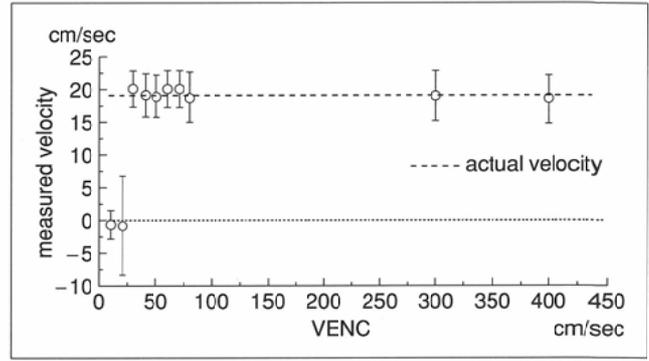


Fig.5 Relationship of velocity encode(VENC) to flow velocity. Larger VENC than actual velocity gives correct value but smaller VENC shows errored value.

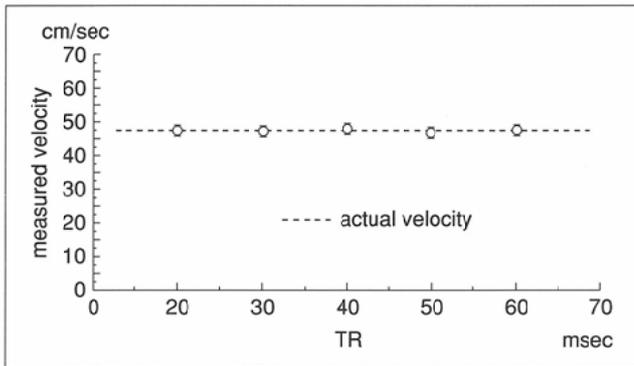


Fig.2 Relationship of TR to flow velocity measured with 2D phase contrast. Measured velocity shows no change while TR is altered.

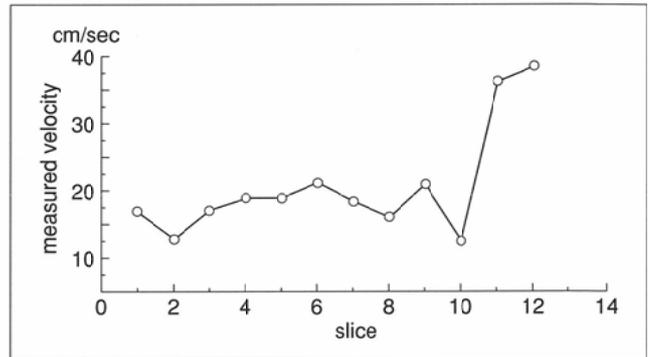


Fig.6 Flow measurement for the vertebo-basilar artery by serial 15mm. Slice 1-2 located on levels below C6, slice 3-8 ; levels between C6-C2, slice 9-10 ; C1, slice 11-12 ; foramen magnum and posterior fossa.

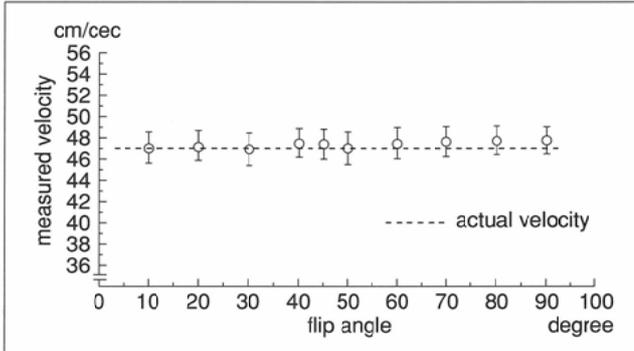


Fig.3 Relationship of flip angle to flow velocity measured with 2D phase contrast. Measured velocity shows tendency to increase slightly.

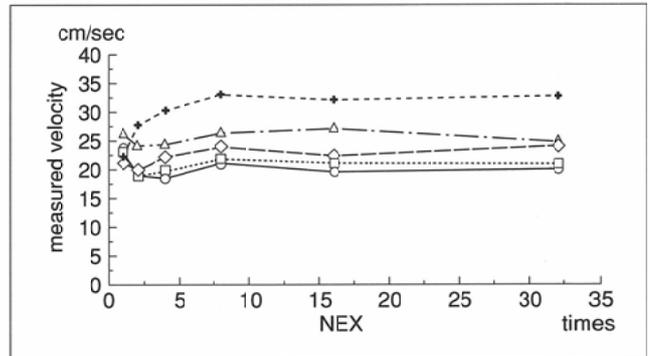


Fig.7 Relationship between number of excitation and measured velocity of the 5 vertebral arteries of the 3 volunteers.

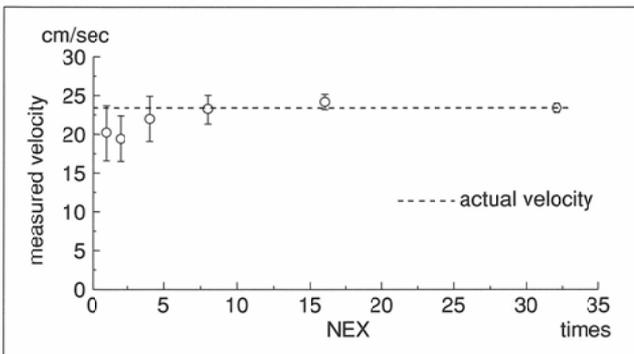


Fig.4 Relationship of number of excitation(NEX) to flow velocity measured with 2D phase contrast. Small times of NEX shows lower mean velocity than actual velocity and larger standard deviation.

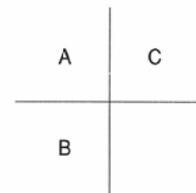
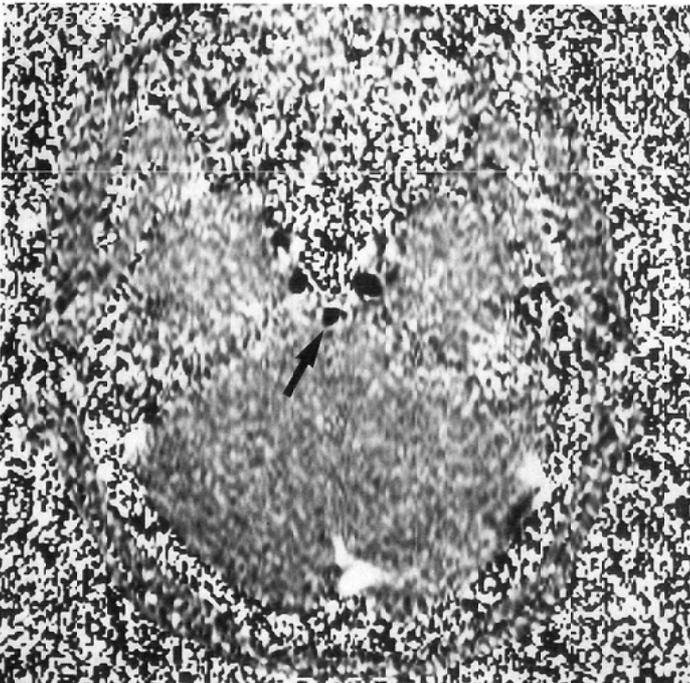
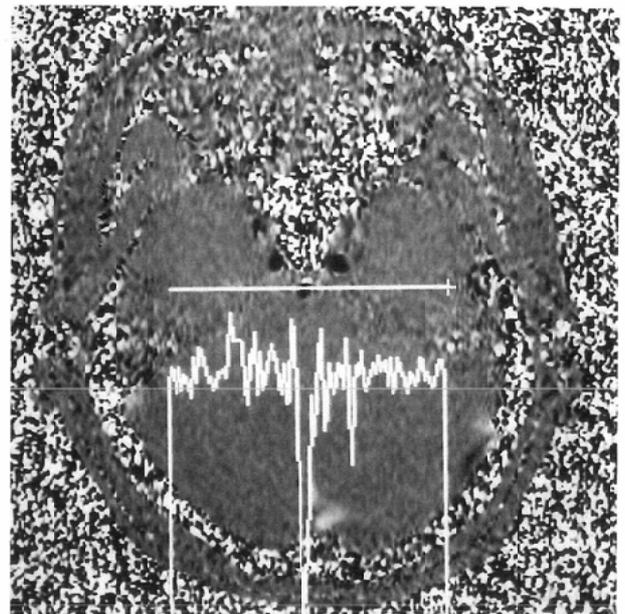
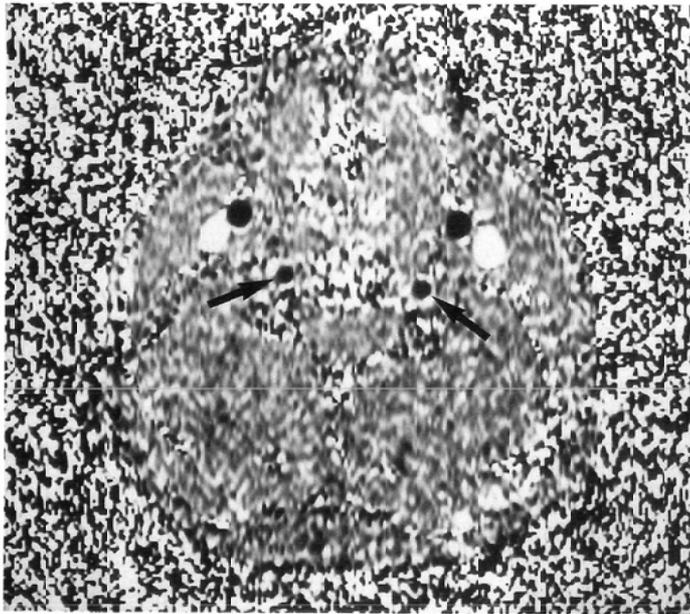


Fig.8 The phase image obtained by using 2D PC in which velocity sensitive encoding gradient is added to superior/inferior direction.
 (A) Axial section at the level of C3. Note the vertebral arteries as hypointensity area (arrow).
 (B) At the level of the sella floor. Note the basilar artery as hypointensity area (arrow).
 (C) The histogram of signal intensity profile including the basilar artery. Signal intensity of the artery abruptly decreases from the stationary tissue. Diameter of the artery was measured on the basis of pixel counting between the points indicated the artery.

は基礎検討の結果より安定した血流速度が得られる部位として椎骨動脈の測定には第3頸椎レベル、脳底動脈の測定にはトルコ鞍底レベルを選択した(Fig.8(A), (B)).

以上の方法で左右の各椎骨動脈と脳底動脈の平均血流速度(Mean Velocity, MV)を測定し、これに血管の断面積を乗じて平均血流量(Volume Flow Rate, VFR)を算出した。椎骨動脈では両側のVFRを合計した総椎骨動脈血流量も検討項目とした。

血管の断面積をコンソール上で求める場合、ウインドー設定に左右され正確な計測が困難である。このため筆者らは位相画像上の血管断面を含む2点間の信号強度のヒストグラムを作成し、血管を示す2点間のピクセル数より直径

を求め断面積を算出した。この方法によってウインドー設定に左右されずに血管径が測定可能で、その精度は $\pm 1.2 \times 10^{-3} \text{cm}^2$ であった(Fig.8(C))。血管の断面が正円形でない場合は短径を測定しこれを直径とした。

結果

Table 1に健常群66例の椎骨動脈、脳底動脈のMV, VFRを測定した結果を示す。右椎骨動脈のMVは15.6cm/sec, 左椎骨動脈は16.1cm/secであった。またVFRは右椎骨動脈では74.2mL/min, 左椎骨動脈では88.8mL/minで、左右の椎骨動脈のMV, VFRに有意差は見られなかった。総椎骨動脈のVFRは163.0mL/minであった。脳底動脈のMVは30.4cm/sec, VFRは129.3mL/minであった。脳底動脈のVFRは総椎

Fig.9 Diagram of vertebral and basilar artery MV versus age in normal group. Right vertebral artery linear regression : $y = -0.63x + 188.66$, $r = 0.236$ (not significant). Left vertebral artery linear regression : $y = -0.70x + 197.06$, $r = 0.276$ ($p < 0.05$). Basilar artery linear regression : $y = -2.21x + 416.99$, $r = 0.444$ ($p < 0.001$).

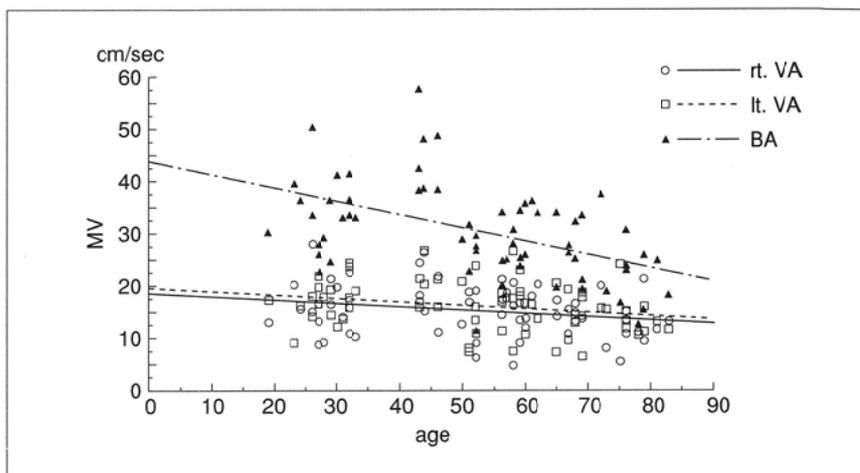


Fig.10 Diagram of vertebral and basilar artery VFR versus age in normal group. Total vertebral artery linear regression : $y = -0.42x + 185.93$, $r = 0.129$ (not significant). Basilar artery linear regression : $y = -1.00x + 180.22$, $r = 0.319$ ($p < 0.01$).

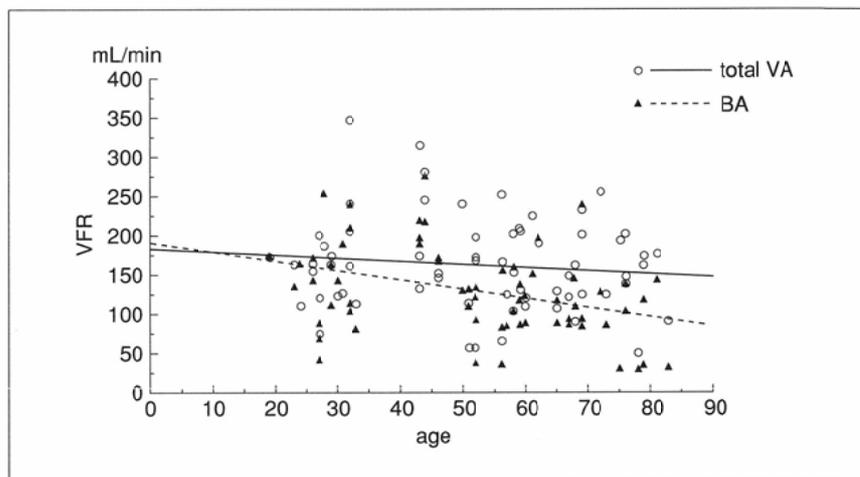


Table 1 Mean Velocites and Volume Flow Rates in Normal Group

	MV (cm/sec)	VFR (mL/min)
Right vertebral	15.6±4.8	74.2±41.4
Left vertebral	16.1±4.8	88.8±54.7
Total vertebral		163.0±59.2
Basilar	30.4±9.0	129.3±56.2

Table 2 Mean Velocites and Volume Flow Rates in Vertigo Group

	MV (cm/sec)	VFR (mL/min)
Right vertebral	12.0±3.7 (N. S.)	47.9±28.2
Left vertebral	15.9±3.9 (N. S.)	85.8±43.5
Total vertebral		133.7±38.2 (N. S.)
Basilar	22.6±6.9 ($p < 0.1$)	91.9±46.0 ($p < 0.05$)

N. S. : not significant

骨動脈のVFRよりも平均で33.7mL/min低い値を示した。

Fig.9に椎骨、脳底動脈のMVの年齢に対する分布を示し、回帰直線を求め表示した。年齢に対する相関係数の検定で右椎骨動脈では有意差はなかったが、左椎骨動脈では加齢とともに有意な低下が認められた($p < 0.05$)。脳底動脈では顕著なMVの低下が認められた($p < 0.001$)。

Fig.10に年齢に対する総椎骨動脈、脳底動脈のVFRの分布を示した。総椎骨動脈のVFRは年齢に対する相関係数の検定で有意差は認められなかった。脳底動脈では有意な血流低下が認められた($p < 0.01$)。

めまい患者の椎骨動脈、脳底動脈の
平均血流速度、平均血流量

対象

対象は明らかな前庭障害がなく、VBIと診断されためまい患者20例(年齢35-82歳、平均61.1歳、男:女=13:7)で、全例に頭位性のめまいと眼振等の何らかの脳幹症状を認めた。

結果

Table 2に測定の結果と健常群との有意差検定の結果を示す。検定は各群の年齢分布を考慮し、2群間の回帰直線の検定で行った。右椎骨動脈のMVは12.0cm/sec、左椎骨動脈は

15.9cm/secであった。総椎骨動脈のVFRは133.7mL/minであった。めまい群では椎骨動脈の血管径に左右差を認める症例が多く、右椎骨動脈の速度が低い症例が多かったが、右椎骨動脈、左椎骨動脈および両者の平均のいずれにおいても健常群との間に有意差を認めなかった。また総椎骨動脈のVFRにも健常群との間に有意差は認めなかった。

脳底動脈のMVは22.6cm/secで、回帰直線の検定で健常群との間に1%の危険率で有意差が認められた。特に30歳、40歳代の中年層で顕著であった。またVFRは91.9mL/minで、健常群との間に5%の危険率で有意差が認められた。

考 察

体平衡の維持は、視覚、前庭系および体性感覚からの情報が脳幹に伝達され、小脳や大脳での統合、制御により保たれている¹⁾。前庭神経核の存在する延髄、小脳およびそれらを結ぶ橋は、体平衡の中核として重要視されている。そのため椎骨脳底動脈系の循環障害によってめまい感が惹起されることが知られている²⁾。特に延髄橋移行部にある前庭神経核領域は、他の神経核領域より血流障害に対して抵抗性が弱いといわれている³⁾。臨床的には椎骨脳底動脈系の循環障害によって引き起こされるめまいは意外と多く、めまい感とともに頭位性眼振、頭位性めまいや脳幹症状を認めるものが多いとされる。椎骨脳底動脈系の血流動態に異常を招く病態⁴⁾として粥状動脈硬化症、動脈自身の捻れ・屈曲などの血管内要因、変形性脊椎症の骨棘などによる椎骨動脈への圧迫・狭窄などの血管外要因や心疾患・低血圧・高脂血症などの全身性要因、血管運動を支配している自立神経系の因子などがある。

めまい症例に対する椎骨脳底動脈系の形態的な研究において屈曲、蛇行、狭窄等の異常が高頻度に見られることが知られている^{5), 6)}。このことは形態的变化が血流量の変化をきたし、さらに頭位変換、体動などが引き金となって急激な血流低下を引き起こし、めまいが生じるものと考えられる。このようにめまいの診断、病態把握には椎骨脳底動脈系の血流動態の解明が重要である。

従来、椎骨脳底動脈系の血流速度の測定方法としては、超音波ドップラー法^{7), 8)}で頭蓋入口部の椎骨動脈の血流速度を測定する方法や経頭蓋内超音波ドップラー法⁹⁾で脳底動脈の血流速度の測定等が行われている。しかし、いずれも骨によるアーチファクトや血管走行の多様性のために、必ずしも再現性のある安定した測定値が得られない。

MRIの流速測定の方法は、古くは1959年にSingerのtime of flight法による計測¹⁰⁾、1960年にHahnの位相法による計測¹¹⁾が提唱され、近年になって装置の改良とともに各種の方法が開発され、良好な結果が報告されている¹²⁾⁻¹⁵⁾。MRIによる流速測定の特徴は非侵襲的であり、周囲の臓器、組織に関係なく空間を移動する物質(プロトン)からのみの信号を得られることである。

ファントム実験の結果から、2D PC法での測定値と実測値

は極めて良好な相関が認められた。またスキャンパラメータの検討では、TRの変化に対しては測定値に影響は認められなかった。flip angleを大きくすると僅かに測定値が増大する傾向が認められた。大山等¹⁷⁾は本法の基本シーケンスであるGRASSでは、flip angleが20度付近に信号強度のピークがあり、30度を越えると大きく信号強度が低下するためノイズの影響が顕著になるためと考察している。しかし臨床に应用する際には、無視できる誤差範囲の変化と考えられた。

問題点として定常流では精度の高い測定が可能であるが、加速度項あるいはより高次の運動により誤差を生じることである。これに対してはTEをできるだけ短くすることによってその影響を最小限に抑えられるが¹⁸⁾、本装置では自動的にシステム上最短TEが決定されるため検討項目から除外した。

臨床応用では加速度項の影響を排除するために血流速度の比較的安定している部位を選択し、同一ボクセル内に流水と静止水が入ることによって生じるpartial volume効果を防ぐために、目的とする血管に対して直交する断面を設定する必要がある。ボランティアで行った検討では、椎骨動脈は第6頸椎から第2頸椎までの間で、脳底動脈は起始部よりやや上方で安定した血流速度が得られ、測定部位として適当と考えられた。

phase contrast法による流速測定の臨床応用に関する報告は、これまでcine PC法を用いたものが多い¹³⁾⁻²⁰⁾。これは心拍同期をかけ1心拍を16ないし32分割した位相画像を撮像し、各画像ごとの血管の信号強度と断面積を測定することによって平均血流速度、平均血流量および1心拍当たりの脈波形が得られる。今回筆者らが用いた2D PC法では脈波形は得られない。しかし心拍同期の必要もなく、最短のTRを選択し、1断面当たり37秒の撮像をルーチン検査に追加するだけでよい。また測定に要する手間もcine PC法に比べ簡便である。脈波形より疾患の病態を論ずる場合は、cine PC法やbolus tracking法¹³⁾が必要であるが、平均血流速度、平均血流量のみを求める場合は2D PC法で十分と考える。

健常人を対象とした椎骨、脳底動脈の測定の結果、平均血流速度に加齢に伴う有意な低下を認めたのは左椎骨動脈と脳底動脈であった。椎骨動脈の平均血流速度が左側のみ有意差が認められたのは、しばしば左椎骨動脈の血管径の方が大きく、循環血液量もdominantと考えられる症例が多いことと関係していると考えられる。Marks等¹⁸⁾は椎骨動脈について測定していないが、内頸動脈では加齢による血流速度の低下を認めず、脳底動脈にのみ有意な流速低下を認めたと報告しており、筆者らの結果と一致していた。

筆者らは椎骨動脈の平均血流量については、左右おのこの値を合計した総椎骨動脈血流量として検討した。その理由は脳幹、小脳への血液の供給源である椎骨動脈は左右それぞれが独立して存在するのではなく、その両者が合流して必要十分な血液量を供給しているからである。総椎骨動脈血流量と脳底動脈血流量の差は平均で33.7mL/minであ

り、椎骨動脈より分岐する頸部筋枝、脊髄枝、硬膜枝や後下小脳動脈への血流量に相当すると推察する。結果的には総椎骨動脈血流量では健常群において加齢による有意な減少は認められなかった。これに対し脳底動脈血流量は加齢による有意な減少を認めた。これは加齢とともに動脈硬化等によって起こる循環血流量の変動に対し椎骨動脈は左右で相補的な役割を演ずるのに対し、脳底動脈では狭窄等の病態への代償作用が十分に働かないためと考えられる。

VBIによるめまい群は健常群に対し脳底動脈で平均血流速度、平均血流量ともに有意な低下が認められた。各年代別に検討すると、高齢者では統計的に明らかな有意差はなかったが、若～中年層で顕著な有意差が得られた。このことはMRアンギオグラフィーを含めた血管造影検査で形態的な異常を認めることが少なく、原因を特定することが困難な比較的若年層のめまいの診断に有用と考えられる。

どの程度血流量が低下すればめまいが発現するかは、個々の体格や心拍出量およびめまいの原因となる病態によって異なると考えられ、その域値について言及することは困難である。しかしめまいを前駆症状としたさらに重篤な脳血管障害の予防や、循環改善剤投与に対する治療効果の判定、経過観察に本法は有用と考えられる。

以上より、VBIの血流動態を解析するに当たっては椎骨動

脈ではなく脳底動脈で検討されるべきであり、超音波ドップラー法では不十分であると考えられる。MRIによる流速測定法は、椎骨動脈や頭蓋内の血管など骨に囲まれた領域の血管に対する信頼性のある流速測定を初めて可能にしたといっても過言ではないだろう。

結 語

1. ファントム実験の結果、2D PC法の測定値と実測値は極めて良好な相関を示した。
2. 健常群での検討で、左椎骨動脈の平均血流速度と脳底動脈の平均血流速度および平均血流量に加齢による有意な減少を認めた。
3. めまい群では健常群に比し、脳底動脈の平均血流速度、平均血流量の有意な低下を認めた。このことからVBIの血流動態の解析には、椎骨動脈より脳底動脈の流速測定が重要である。
4. 2D PC法は心拍同期を必要とせず、短時間の撮像をルーチン検査に追加するだけで容易に流速測定が可能であり、本法はVBIの診断、治療効果判定、経過観察等に有用である。

文 献

- 1) 水越鉄理：めまい平衡障害とは。めまい・平衡障害の診断と治療；情報処理システムを中心に。p.3-25, 1988, 現代医療社, 東京
- 2) 長島親男：椎骨脳底動脈不全によるめまいの病態生理と臨床；Glass Modelによる流体実験と本症185例の臨床資料を中心に。災害医学 14：1326-1336, 1971
- 3) 松永 喬：椎骨動脈血流動態異常とめまい。耳鼻臨床 85：1531-1541, 1992
- 4) 松永 亨, 荻野 仁：椎骨脳底動脈疾患。JOHNS 4：951-958, 1988
- 5) Inamori T, Machizuka H, Kumoi T, et al : Intravenous digital subtraction angiography for patients with positional nystagmus. *Auris.Nasus.Larynx* 13 (suppl.II) : 113-121, 1986
- 6) 瀬尾 徹, 富永 了, 藤木宏也, 他：頭位性めまいのMRアンギオグラフィー。耳鼻臨床 86：1545-1551, 1993
- 7) 松永 喬, 川本浩康, 奥村新一, 他：めまい患者と超音波椎骨動脈検査法(Doppler法)；モデル実験との対比。耳鼻臨床 67：763-774, 1974
- 8) 津田 守：めまい患者における椎骨動脈血流動態およびその修飾因子について。日耳鼻 89：886-898, 1986
- 9) Caplan LR, Brass LM, DeWitt LD et al : Transcranial Doppler ultrasound ; present status. *Neurology* 40 : 696-700, 1990
- 10) Singer JR : Blood flow rates by nuclear magnetic resonance measurements. *Science* 130 : 1652-1653, 1959
- 11) Hahn EL : Detection of sea-water motion by nuclear precession. *J Geophys Res* 65 : 776-777, 1960
- 12) Shimizu K, Matsuda T, Sakurai T : Visualization of moving fluid ; quantitative analysis of blood flow velocity using MR imaging. *Radiology* 159 : 195-199, 1986
- 13) 野村邦紀, 仁谷立介, 瀬戸 光, 他：核磁気共鳴法による下肢動脈血行動態の評価；加齢による変化と下肢動脈閉塞性疾患における病的血行動態の特徴。日本医放会誌 53：1313-1323, 1993
- 14) Zerhouni EA, Parish DM, Rogers WJ, et al : Human heart ; tagging with MR imaging—a method for noninvasive assessment of myocardial motion. *Radiology* 169 : 59-63, 1988
- 15) Dumoulin CL, Hart HR : Magnetic resonance angiography. *Radiology* 161 : 717-720, 1986
- 16) Walker MF, Sousa SP, Dumoulin CL : Quantitative flow measurement in phase contrast MR angiography. *J Comput Assist Tomogr* 10 : 304-313, 1988
- 17) 大山 泰, 藤井紀生, 松枝孝次, 他：Phase contrast法による定量的な流速計測；スキャンパラメーターの影響について。日獨医報 39：115-123, 1994
- 18) Marks MP, Pelc NJ, Ross MR, Enzmann DR : Determination of cerebral blood flow with a phase contrast cine MR imaging technique ; evaluation of normal subjects and patients with arteriovenous malformations. *Radiology* 182 : 467-476, 1992
- 19) Bendel P, Buonocore E, Bockisch A, et al : Blood flow in the carotid arteries ; quantification by using phase-sensitive MR imaging. *AJR* 152 : 1307-1310, 1989
- 20) 鹿島田明夫, 町田喜久雄, 本田憲業, 他：2D cine phase contrast法による脳血流測定；測定精度検討と正常例における測定。日本医放会誌 54：1116-1125, 1994