シリーズ教育講座「画像検査で脳を探る」

3. 超音波検査—椎骨脳底動脈系の超音波検査について—

斎藤こずえ・上野 聡

Duplex color-coded ultrasonography for evaluation of
the vertebrobasilar arteries

Kozue Saito, Satoshi Ueno

Nara Medical University, Department of Neurology

Duplex color-coded ultrasonography performed for evaluation of the cerebrovascular arterial system consists of transcranial and carotid ultrasonography. Vertebral arteries (VAs) pass through the foramina of the cervical transverse processes and unite to form the basilar artery, which affects the blood flow in each vertebral artery. Neck motions also affect the blood flow in the VAs. Carotid ultrasonography enables us to diagnose occlusion of the VAs, the subclavian steal phenomenon, VA dissection, and the Bow-Hunter syndrome. These disturbances of blood supply in the VAs often cause vertigo and dizziness, which result in vertebrobasilar insufficiency, sometimes resulting in cerebral infarction. The level of VA occlusion is diagnosed as follows; 1) Absence of apparent flow signals in the VAs indicates origin occlusion. 2) Preserved systolic velocity, but zero end-diastolic velocity indicates occlusion before the branching off into the posterior inferior cerebellar arteries (PICA). 3) Mean velocity (MV) < 18 cm/sec and MV-ratio (mean flow velocity in the contralateral VA divided by that in the target VA) ≥ 1.4 indicate PICA-end or VA occlusion after branching off of the PICA. These could be further distinguished as follows: A diameter-ratio (diameter of the contralateral VA divided by the diameter of the target VA) ≥ 1.4 indicates PICA-end occlusion. A diameter-ratio < 1.4 indicates VA occlusion after branching off of the PICA. Retrograde VA flow indicates the subclavian steal phenomenon, which can cause vertebrobasilar ischemia during exercise of the upper extremities. Neck motions sometimes damage the VAs and cause dissection, which produces flaps and stenoses in the VAs. Rotational VA occlusion, the so-called Bow-Hunter syndrome, can be diagnosed by transient change of the blood flow velocity to the occlusive pattern during neck rotations. Transcranial ultrasonography allows direct evaluation of the blood flow in the intracranial vertebrobasilar arteries. This method enables us to confirm the results of carotid ultrasonography, such as in basilar artery occlusion, in which retrograde flow is observed in the basilar artery. Duplex color-coded ultrasonography is less invasive and feasible for bedside examination, and allows real-time evaluation of the cerebrovascular arteries.

Key words: duplex color-coded ultrasonography, vertebral artery, vertebrobasilar, insufficiency

はじめに

超音波検査は侵襲が少なくベッドサイドで簡便に施行でき、解剖学的評価と血流評価がリアルタイムに行えることから得られる情報は非常に多い。脳を探索上での超音波検査としては頸動脈超音波検査と経頭蓋超音波検査が挙げられる。近年超音波診断装置の進歩は目覚ましく、より解像度のすぐれた、さまざまな処理が可能な機器が登場しており詳細な評価が可能となってきた。本稿では、頭頸部血管、特に平衡機能に関連の深い、椎骨脳底動脈系に関連した頸動脈超音波検査と経頭蓋超音波検査について述べていきたい。

1. 椎骨脳底動脈系の解剖

左右の椎骨動脈はそれぞれ鎖骨下動脈より分岐し、主として第6頸椎レベルから横突起に入り上行する。頭蓋内で後下小脳動脈（PICA）が分岐した後、左右の椎骨動脈が合流して一本の脳底動脈となり、前下小脳動脈（AICA）、上小脳動脈の枝を出したのち、再び分岐し左右の後大脳動脈に終わる（図1）。

椎骨動脈は左右が合流し一本の脳底動脈になり上行するため互いの血流が影響しあったり、椎骨動脈の血流がより遠位の脳底動脈や、後大脳動脈の血流に影響を受けるといった特徴がみられる。椎骨脳底動脈系は個人差が大きく、後大脳動脈が内頸動脈系から分岐し、脳底動脈から分岐しない場合があり、椎骨動脈が低形成となることがあるため注意が必要である。また、頸椎横突起内を走行し、頭蓋内に流入していくため、頸部の回旋や伸展屈曲などの運動で、血管が圧迫されたり牽引されることがあり、こうした運動が血流に影響を与えうる。椎骨動脈硬化性病変の好発部位としては、起始部、PICA分岐手前、PICA後から脳底動脈合流手前部分が挙げられ、閉塞すると椎骨脳底動脈領域の脳梗塞を引き起こすことがあり診断は重要である。

2. 頸動脈超音波検査の実際

7.5 MHz以上のリニア型の探触子を用いることが多い。椎骨動脈は深部を走行しているため、以前はBモード法での観察が困難なこともあったが、現在の装置であれば観察できないということはずくない。患者の前側面から総頸動脈を長軸方向に描出し、そのまま外側方向に探触子を平行にゆっくりと移動させると、椎骨の横突起による音響陰影像が現れ、その間に走行する椎骨静脈と椎骨動脈が観察される（図2）。探触子に近いほうが椎骨静脈で深部のほうが椎骨動脈であるが、ドブラ法を用いて血流パターンを観察し動脈の波形で中枢側に流れていることを確認する。後述するが、血流が頭側から心臓側にむかって流れていることがあり、鎖骨下盗血現象とよばれ、めまいなどの原因となることが知られている。Bモード法及びカラードブラ法で血管を同定し、血管径を計測する。血管径は健康人でも左右差があることがあり左が右に較べて大きいことが多い。次に、パルスドブラ法を用いて血流を測定する。正常では、血圧や心機能にもよるが、図3のような内頸動脈に類似したパターンを呈する。

起始部に高度の狭窄があると、著しい収縮期血流速度上昇がみられ診断できるが¹⁾、実際には起始部に蛇行があるなど直接の観察は困難なことが多い。このため通常エコーで観察する位置での血流パターンが、立ち上がりの遅い post-stenotic pattern であることを示すことで起始部に高度狭窄があると推定され有用である（図4）。

1) 椎骨動脈閉塞

めまいや運動失調をきたした場合、末梢性の障害なのか、小脳や脳幹部の中核性障害であるかは、その後の予後に大きく影響を与えるため重要である。もちろん頭部MRIやMR angiographyを用いれば梗塞巣や閉塞血管を診断することは可能であるが、頸動脈超音波検査はベッドサイドで簡便に頸部の血管を検査することで頭蓋内血管の閉塞を推測することができ有用である。また、閉塞が疑われても、PICA後閉塞の際には、低形成あるいは以前からの無症候性閉塞（PICA-end）

の場合があり、今回症候性に閉塞したかどうかを鑑別することも重要となる。閉塞診断の際に重要となるのは、閉塞部位がPICA分岐後か分岐前かで大きく血流パターンが異なることである。起始部閉塞では血流シグナルがみられないことは当然であるが、PICA前閉塞では拡張末期血流(EDV)が見られなくなる(図5-A, a)。PICA後閉塞では、拡張末期血流速度、平均血流速度(MV)共に低下しており、平均血流速度が18 cm/s未満でPICA後閉塞と診断できる。ただし、全身の動脈硬化や年齢などを反映して、拡張期血流速度や平均血流速度が全体的に低下している症例があり、このような場合に、閉塞を診断するためには、

図1 椎骨脳底動脈系の血管解剖

左右差 (Mean-ratio = 対側 MV / 注目側 MV) を用いて Mean-ratio > 1.4 の際に今回閉塞したと考えられる PICA 後閉塞あるいは PICA-end と診断する (図5-B, b, C, c)。さらに、PICA-end では血管径が対側に比して低値であることに着目して、Diameter-ratio (= 対側 VA 径 / 注目側 VA 径) を導入することにより Diameter-ratio > 1.4 で PICA-end と診断することが可能である²⁾ (図6)。このような流れで診断を行い、可能であれば経頭蓋超音波検査もあわせて行うことで、より正確な評価が行える。

2) 鎖骨下動脈盗血現象 (Subclavian steal phenomenon)

一側の鎖骨下動脈が狭窄または閉塞した場合、上肢への血流を供給するために患側の椎骨動脈が逆流する現象が鎖骨下動脈盗血現象であるが、患側上肢の運動の際に、しびれなどと共に、めまい、複視といった椎骨脳底動脈系の神経症候も呈する場合、鎖骨下盗血症候群と称される。椎骨動脈の血流は、鎖骨下動脈の狭窄の程度により変化する。狭窄が軽度の場合にはドプラ波形で収縮期中期に血流速度が低下し、さらに進むと収縮期に逆行する to-and-fro となり、さらに進行すると完全に逆行性になる^{3,4)} (図7)。

3) 椎骨動脈解離と Bow hunter 症候群—頸部の運動による椎骨動脈血流への影響—

椎骨動脈は内頸動脈と異なり、頸椎横突起内を走行し、頭蓋内に流入していくため、頸部の回旋や進展屈曲などの運動で、血管が圧迫や牽引され、動脈解離を来したり、血流の低下や遮断などの影響を受けることがある。めまい、嚥下障害とともに病側の小脳失調、感覚障害や対側半身の感

図2 頸動脈超音波検査Bモード画像 (長軸像)

図3 各動脈のドプラ波形

図4 椎骨動脈起始部狭窄

- 4 A ドプラ波形（上段はカラードプラ画像）横突起間の観察で、収縮期血流の立ち上がり時間の延長を認める（矢印）
- 4 B 頭頸部 MR angiography；右椎骨動脈起始部（矢印）に狭窄を認める

図5 上段は椎骨動脈血管造影（側面像），下段は同血管のドプラ波形

- 5 A, a PICA 前閉塞
5 B, b 症候性 PICA 後閉塞
5 C, c PICA-end
5 D, d 正常

図6 椎骨動脈閉塞部位診断フローチャート

覚異常などの症状を呈する（Wallenberg 症候群）延髄外側の脳梗塞の原因は椎骨動脈解離に多いことが知られているが⁵⁾⁶⁾，動脈解離を直接，頸動脈エコーで観察できる場合がある（図8）Bモード法で flap が確認できたり，狭窄や閉塞を伴うため，ドプラ法で狭窄による流速上昇が示されるこ

とがある⁷⁾。

頸部の回旋などの運動によりめまいが見られることは頭位変換性めまいなどの末梢性めまいでみられることが多いが，頸部回旋により，先に述べたように椎骨動脈の血流が障害され，めまいや脳幹部虚血症状が出現する場合がある。こういった症候は Bow hunter 症候群と呼ばれる。特に，一側椎骨動脈が低形成などにより PICA で終了している場合や閉塞の場合に，対側椎骨動脈が回旋による圧迫で一過性に血流低下をきたすと，脳幹部や小脳に急激な血流低下が起こり，めまいや意識消失などの症状をきたす。頸動脈超音波検査では，頸部を正中位にして椎骨動脈波形を記録した後，症状が出現する頸部の位置を再現し，その際の椎骨動脈血流がどう変化するかを観察することで診断ができる。一過性の閉塞がみられる場合には，上述のような PICA 後や PICA 前での閉塞パターンに変化するため，非常に有用である⁸⁾（図9）。リアルタイムでの評価は超音波でなければ難しく，また血流への影響がどの程度で出現するかを調べることで，症状を回避することも可能で

図7 鎖骨下動脈盗血現象（椎骨動脈ドプラ波形）

7 A 正常

7 B 収縮期に notch がみられる（矢印）

7 C さらに鎖骨下動脈狭窄が進行すると、収縮後期に逆流が観察される

D 鎖骨下動脈閉塞では完全に逆流する

図8 椎骨動脈解離

8 A Bモード画像（長軸像）椎骨動脈内に flap を認める。（矢印）

8 B 椎骨動脈血管造影（側面像）解離による狭窄と拡張を認める（矢印）

図9 頸部回旋による椎骨動脈の一過性閉塞

9 A 正中位置での血管造影（正面像）

9 B 1-2 正中位置での血管造影（正面像：9 A 白線部分の拡大）下段はドプラ波形（B 2）

9 C 1-2 頸部を回旋すると椎骨動脈が一過性に閉塞される（矢印）ドプラ波形（C 2）では拡張末期血流速度の消失がみられる。

図10 大後頭ウィンドウより観察された経頭蓋カラードプラ画像（10A）。頭部MR angiography（10A）の白線の部分にあたる位置の観察が可能である。

図11 脳底動脈閉塞症例

両側椎骨動脈は閉塞し、脳底動脈の描出は乏しく遠位の描出しか見られない(11A：頭部MR angiography)。経頭蓋超音波検査では、脳底動脈は遠位から近位に向かう逆行性の血流(11B：矢印の方向)になっていることがドプラー波形からわかる。

ある。

4) めまいとの関連について

めまい患者では椎骨動脈の血流低下や左右差が健常人に比して多いといわれている。こういった、血行動態の変化は中枢性めまい患者のみならず、末梢性めまい患者でも約20%でみられ、なかでも、メニエール病や突発性難聴で、それぞれ約30%に認められるとされている⁹⁾。また、最近では、突発性難聴がその後の脳梗塞発症と関連していることが示唆され、こういったことから末梢性と考えられている疾患でも脳血流障害と関連している可能性がある¹⁰⁾。椎骨脳底動脈系の血流障害によるめまいは、椎骨脳底動脈循環不全(VBI: vertebro-basilar insufficiency)とよばれるが、上記のように閉塞など器質的病変を有さない場合はhemodynamic VBI (hVBI) とよばれている¹¹⁾。こういった患者のなかには、閉塞や狭窄病変がないにもかかわらず血流が関序になる slow blood flow とよばれる現象がみられることがあり¹²⁾、ドプラ波形では収縮期、拡張期ともに速度が低下し、血液の粘性などに関連している可能性が考えられている。また、めまいの経過中にも血流が変化することがあり、めまい発作時には血流低下や

左右差を示し、消失時には正常となる報告もみられている⁹⁾。

3. 経頭蓋超音波検査

頭蓋内血管は頭蓋骨に覆われているため、超音波が到達しにくく観察が難しいが、こめかみの部分にあたる側頭骨には骨が薄く比較的超音波の到達しやすい場所があり、ウイリス動脈輪を中心に中大脳動脈、前大脳動脈、後大脳動脈を観察することができる側頭骨ウィンドウがある。また、大後頭孔から覗きあげるような位置で椎骨脳底動脈を観察できる大後頭ウィンドウがあり、この両者を用いれば頭蓋内主幹動脈の多くは観察が可能である。以前は経頭蓋ドプラ検査としてBモード画像のない装置を用いて、深度とプローブ方向で、血管を推定し観察していることが多かったが、この場合、血管の走行に応じて本来必要な角度補正ができず正確な流速評価ができないことや、解剖学的に正確に血管を同定することは困難であった。これに対し、現在では経頭蓋カラードプラ法としてBモード画像やカラードプラ画像が得られるため解剖学的評価や血管の走行が正確に評価できるようになっている。検査の実際としては、2 MHz 程度のセクタ型探触子を用いて観察する

と、延髄の周囲に2本の椎骨動脈が観察され、さらに探触子から70-100 mmの深さで両者が合流し脳底動脈に移行し、約90-100 mm程度まで観察が可能である¹³⁾ (図10)。脳底動脈の検出率は75%程度である。骨の問題や深さの問題で、低い周波数のために、頸動脈超音波検査と異なり、解像度は十分でないため解剖学的な評価は困難な場合も多い。評価方法としては、カラードブラ法による血流方向やパルスドブラ法を用いた、流速測定を行う。これにより、椎骨動脈の閉塞や狭窄、脳底動脈の逆流などの評価を行うことができ、頸動脈超音波検査で疑われた頭蓋内での椎骨動脈閉塞疑いを直接検査することが可能となる。経頭蓋超音波検査では、脳底動脈の近位部の評価が可能であるが、めまいや難聴、耳鳴とともに病側の末梢性顔面神経麻痺、顔面の感覚異常と対側半身の感覚障害などの症状がみられるAICA症候群では、前下小脳動脈(AICA)が分岐する脳底動脈の狭窄病変が関与していることがあり¹⁾、脳底動脈も評価できる経頭蓋超音波検査の有用性は大きい。また、両側の椎骨動脈病変では、脳底動脈が逆行することで脳幹部の血流をようやく保っている場合がある。経頭蓋超音波検査で、カラードブラ法、パルスドブラ法を組み合わせ、逆流をとらえられることがある¹⁴⁾。こういった現象はMR angiographyやCT angiographyでは評価が難しいところであり、有用性は大きい(図11)。

文 献

- 1) Amarenco P, Rosengart A, DeWitt LD, et al.: Anterior inferior cerebellar artery territory infarcts. Mechanisms and clinical features. *Arch Neurol* 50: 154-161, 1993
- 2) Saito K, Kimura K, Nagatsuka K, et al.: Vertebral artery occlusion in duplex color-coded ultrasonography. *Stroke* 35: 1068-1072, 2004
- 3) Yip PK, Liu HM, Hwang BS, et al.: Subclavian steal phenomenon: a correlation between duplex sonographic and angiographic findings. *Neuroradiology* 34: 279-282, 1992
- 4) Kliever MA, Hertzberg BS, Kim DH, et al.: Vertebral artery Doppler waveform changes indicating subclavian steal physiology. *AJR Am J Roentgenol* 174: 815-819, 2000
- 5) Hosoya T, Nagahata M, Yamaguchi K: Prevalence of vertebral artery dissection in Wallenberg syndrome: neuroradiological analysis of 93 patients in the Tohoku District, Japan. *Radiat Med* 14: 241-246, 1996
- 6) Hosoya T, Watanabe N, Yamaguchi K, et al.: Intracranial vertebral artery dissection in Wallenberg syndrome. *AJNR Am J Neuroradiol* 15: 1161-1165, 1994
- 7) Bartels E, Flugel KA: Evaluation of extracranial vertebral artery dissection with duplex color-flow imaging. *Stroke* 27: 290-295, 1996
- 8) Sakaguchi M, Kitagawa K, Hougaku H, et al.: Mechanical compression of the extracranial vertebral artery during neck rotation. *Neurology* 61: 845-847, 2003
- 9) 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
- 10) Lin HC, Chao PZ, Lee HC: Sudden sensorineural hearing loss increases the risk of stroke: a 5-year follow-up study. *Stroke* 39: 2744-2748, 2008
- 11) 松永 喬: 椎骨脳底動脈循環障害におけるめまいの病態生理. *Hemodynamic VBI* とは. 113-116頁, 診断と治療社, 東京, 1997
- 12) Yamasoba T, Kikuchi S, O'Uchi T, et al.: Magnetic resonance angiographic findings in vertiginous patients with slow vertebrobasilar blood flow. *Acta Otolaryngol Suppl* 520 Pt 1: 153-156, 1995
- 13) 古賀政利: 頭蓋内動脈狭窄閉塞性病変(脳底動脈系). *日本脳神経超音波学会. 脳神経超音波マニュアル*. 167-170頁, 報光社, 鳥根県, 2006
- 14) Koga M, Kimura K, Minematsu K, et al.: Relationship between findings of conventional and contrast-enhanced transcranial color-coded real-time sonography and angiography in patients with basilar artery occlusion. *AJNR Am J Neuroradiol* 23: 568-571, 2002