原著

頸部内頸動脈狭窄におけるパワードプラの使用経験

— カラー Doppler との比較と術中所見の検討 —

大槻秀夫 中谷 進 堀部邦夫 中田博幸 山崎麻美 山田正信 井阪俊彦
金村米博 中牟田佳奈 安田恵多良

国立大阪病院脳神経外科

Power Doppler Sonography in the Assessment of Cervical Carotid Artery Stenosis

Hideo OTSUKI, Susumu NAKATANI, Kunio HORIBE, Hiroyuki NAKATA, Mami YAMASAKI, Masanobu YAMADA, Toshihiko ISAKA, Yonehiro KANEMURA, Kana NAKAMUTA, Keitaro YASUDA

Department of Neurosurgery, Osaka National Hospital

The assessment of carotid stenosis and plaque morphology is important for the prevention of cerebral infarction. Power Doppler imaging (PDI) is a new non-invasive technique which can visualize intravascular morphology from the integrated power of the reflected echo mainly from red blood cells. We evaluated PDI and color-flow Doppler imaging (CFDI) for the measurement of carotid stenosis and characterization of the plaque surface and compared the results with surgical specimens. PDI is superior for depicting the vessel lumen with intravascular color signals, but has a tendency to underestimate stenosis due to motion artifacts, whereas CFDI overestimates and underestimates stenosis as determined by angiograms. In hypoechoic stenosis such as radiation-induced angiitis, PDI demonstrates the stenotic vascular lumen clearly. Rough and smooth intrastenotic lumina can be compared, and PDI enhances the surface morphology and depicts rough structures, but fails to delineate ulcerative plaque surfaces clearly. CFDI is useful for assessing ulcerative surfaces due to the presence of turbulent flow. These two types of color-coded Doppler sonography complement each other, and increase the reliability of Doppler imaging for noninvasive diagnosis of carotid artery stenosis.

Key words: power Doppler sonography, carotid endarterectomy, carotid stenosis

はじめに

社会の高齢化に伴い、脳血管性痴呆などを引き起こし正常な日常生活を営むうえでの障害となる脳梗塞予防の重要性が増している。このため、脳梗塞ハイリスク群に対して抗血小板剤などを用いた薬物療法が予防的になされているが、頸部内頸動脈に強い狭窄を合併した例では狭窄部の血栓内膜剥離術により再発の危険性が長期的に低下することが示されている^{2,7)}。また、狭窄部の粥腫内血腫が破綻することにより遠位部に脳梗塞をおこし重篤な神経症状をきたすことも知られている⁸⁾。このため脳梗塞ハイリスク群に対しては頸部血管の形態と狭窄部の性状に注目し、手術も視野にいて治療にあたらなければならない。頸動脈病変の非侵襲的なスクリーニング法として duplex 超音波検査の有用性は確立しているといえるが⁵⁾、血管内腔と血管壁との境界が不鮮明で、duplex 検査の正確さ (sensitivity and specificity) に疑問も出されている^{1,9)}。最近超音波 Doppler 信号の計算処理法を変えることにより、血流描出能を高めたパワー・ドプラ (power Doppler imaging, PDI) が実用化され臨床報告もみられるようになった^{3,10)}。そこで、手術にて狭窄部の粥腫を摘出し標本の得られた内頸動脈血栓内膜剥離術症例にて、内頸動脈の狭窄度、粥腫や内腔の性状を新たに開発された PDI と従来のカラー・ドプラ (color flow Doppler imaging, CFDI)、脳血管撮影所見 (digital subtraction angiography, DSA) とを比較し、外来スクリーニングや術前検査における PDI の有用性を検討した。また、本邦ではよく普及している代表的な非侵襲的頸動脈狭窄病変診断システムである MRA と

も比較した。

対象・方法

超音波診断装置の東芝 SSA-260A にパワー・ドプラ用

Reprint request

大槻秀夫：〒540 大阪市中央区法円坂2-1-14 国立大阪病院脳神経外科

Hideo OTSUKI: Department of Neurosurgery, Osaka National Hospital, 2-1-14 Houenzaka, Chuo-ku, OSAKA 540, Japan

[Received February 20, 1997; Accepted April 4, 1997]

ボードを装着し、超音波Bモード、CFDI、PDIをおこなった。装置が導入された95年12月より、頸動脈血栓内膜剝離術をおこない狭窄部を検討することのできた5症例6側（左3例、右3例）にて検討した。いずれもsymptomaticで初診時症状はTIAあるいはRINDが3例4側、minor completed stroke 2例で、脳血管撮影で頸部内頸動脈に70%以上の狭窄がみられた。手術前にPDI、CFDI、MRA、DSAをおこないそれぞれ比較した。超音波検査のプロープは7.5MHz リニア式を用い、検査結果をビデオ録画した後コンピューターに取り込み、コンピューター上で画像を解析し計測した。

内頸動脈狭窄度は心収縮期（血管拡張期）に計測しNASCETに準じた。Bモード矢状断で総頸動脈を遠位にたどり、必要に応じCFDIやPDIを追加しながら内頸動脈狭窄部を描出した。最大狭窄部の直径と、そのすぐ遠位にある拡張部の直径より狭窄度を算出した。検討項目は内頸動脈の狭窄度、内膜（粥腫）表面の性状、粥腫のエコー強度である。MRAはSiemens社1.5T Magnetomを使用し、内頸動脈狭窄度をNASCETにもとづき0から4の5段階で計測した（Fig. 3）。DSAを基準とみなして、それぞれの散布図をもとに回帰曲線と相関係数（ r ）を求めて検査の信頼性を判定した。手術摘出標本はホルマリン固定ののち粥腫表面と内部の性状、特に粥腫内血腫の有無を判定し、術前の画像診断と比較した。2例では摘出標本で病変部の狭窄度を計測し、血管撮影、超音波検査と比較した。

TIAで発症し、代表的な非侵襲的検査であるMRAで頸部内頸動脈狭窄が疑われながら、DSAでは狭窄がみられなかった例（false positive）を経験した。同様に超音波検査を施行し、false positive例におけるMRAと超音波検査の特徴を比較した。

結 果

総頸動脈分岐部、内頸動脈近位部はいずれの検査法でも全例で描出され検討可能だった。手術施行6例にてPDI、CFDI、MRAで測定した内頸動脈狭窄度とDSAでの狭窄度を比較した（Fig. 1, 2, 3）。CFDIのほうがDSAでの測定値と良く相関していたが、これは99%の高度狭窄3症例でPDIのほうが狭窄度が低く描出されていたのも原因である（PDI：78, 90, 90%, CFDI：99, 99, 90%）。CFDIでは全例狭窄部で乱流が確認された。また内膜近傍ではドプラ信号が弱くなっており、血管壁とみられる高エコー部位とカラー表示部との間にカラー表示されない部位が存在したが、PDIではカラー表示部と高エコー部位とはほぼ接していた。また、CFDIでは血管の拍動が観察できたが、PDIでは血管壁の動きはなく血管内腔が一様に描出されていた。

MRAでの狭窄度は2, 3, 4点それぞれ2例ずつで（Fig. 3）、いずれも遠位部のflow voidが低下していた。超音波検査、MRAとも術前検討時にfalse negativeはみ

Fig. 1

Scatterplot shows correlation (simple regression analysis) of estimates of percentage stenosis between PDI and DSA ($r=0.84$).

Fig. 2

Scatterplot shows correlation (simple regression analysis) of estimates of percentage stenosis between CFDI and DSA ($r=0.94$).

Fig. 3

Scatterplot shows correlation (simple regression analysis) of estimates of percentage stenosis between MRI and DSA ($r=0.91$). On MRA carotid stenoses were graded as follows; 0=no stenosis, 1=mild stenosis (<30%), 2=moderate stenosis (<70%), 3=severe stenosis (<99%), 4=flow void not detected.

Fig. 4

Plaque surface visualized by CFDI (left) and PDI (right) in ICA atherosclerosis. The surface of the stenotic lumen (99%) is easily detectable on PDI because of increased intravascular color signal intensity.

られなかった。内腔表面性状は摘出標本の一例で2 mm径のくぼみがみられ血管撮影とPDIで描出できていたが、CFDIでは判別できなかった (Fig. 4)。また、内膜で完全におおわれていない長径2 mmの潰瘍部が一例の摘出標本で確認できたが、術前検査では明瞭に同定できなかった。摘出標本の全例に新旧の粥腫内血腫がみられ、内部エコーの不均一さを反映していた。粥腫内血腫はDSAやMRAでは判定不能だった。摘出粥腫にて狭窄度を測定できた2例ではいずれもDSA上99%の狭窄で、BモードやCFDIでは心拡張期に内腔が閉じていた。摘出標本でも内腔は閉じていたが、内腔表面は平滑で潰瘍形成はなかった。

MRAでfalse positiveと判定された例では、DSAで確認できた分岐部血管の蛇行がその原因とみられ、間接所見である遠位部のflow voidは正常だった。超音波検査でも蛇行血管の長軸と短軸の同定がむずかしくfalse positiveと判定したが、内膜の肥厚所見はみられなかった。脳血管撮影後に蛇行部の長軸とプローブを合わせると、PDIでは正常の狭窄していない内腔が描出されていたが、CFDIでは乱流が原因で画像が乱れており正常との判定はむずかしかった。

考 察

PDIを用いることにより従来のドプラ画像と比べ血管内腔を明瞭に描出できることを報告した。特にエコー強度の低い粥腫による狭窄病変や、CFDIでは不十分にしか描出されない乱流部位や血管壁近傍のようにドプラ効果が弱い部位でもPDIで明瞭に描出できた。また、MRIと異なりベッドサイドで繰り返し実施可能なうえ、DSAとの相関度もMRIに匹敵していた。PDIはドプラ信号のintegrated powerを画像化しBモードに重ね合せリアルタイムに表示したものである。元となるドプラ信号は従来のCFDIと同じだが、CFDIとは異なる計算式で得られた画像をBモードに重ね合わせるにより、Bモード単独やCFDIでは得られなかった情報が画像化されたことになる。すなわちPDIでは弱いドプラ信号しか得られない低流速での感度が向上している。また、放射される超音波信号は平行ではないために超音波と直角方向の血流も画像化されCFDIの特徴である角度依存性がみられない。このため

PDIでは血管内腔の描出能が高くなっており、内腔表面のポケットのように乱流があり流速も低い部位の形状もよく反映していた。

1991年に頸部内頸動脈狭窄症に対する治療指針が相次いで示されたことより、内腔表面の潰瘍性病変だけでなく内頸動脈狭窄の程度が治療方針の決定に重要とされるようになった。このため、スクリーニングや術後の経過観察に外来でも頻回にかつ容易におこなえる非侵襲的検査である超音波が注目され、従来のBモード画像やCFDIを用いて血管内腔の描出が試みられた。しかし、内頸動脈狭窄の主な原因である動脈硬化性粥腫の成分は均一ではなく石灰化部分や血腫などを含んでいる。今回の症例でも全ての摘出粥腫に粥腫内血腫が同定できた。動脈硬化性粥腫は超音波的に不均一であり、本報告でも経験したエコー強度の低い病変のようにBモード画像単独では血管内腔と判別不能な部位も存在している。このため、CFDIなど従来の超音波検査法により形態的に狭窄度を比較するだけでは不十分な結果しか得られないので¹¹⁾、狭窄度の指標としてドプラ法から得られるpeak flow velocityやpeak systolic frequencyによる定量的診断が推奨されている^{6, 12)}。今回報告したPDIの特徴は血管内腔がよく描出される点にあり、このPDIを用いることにより脳血管写のようにイメージにもとづいた計測診断が可能になると期待し内頸動脈の狭窄度を測定した。その結果、血管内腔がDSA所見よりも強調され一様に狭窄度が低く描出されていた。この原因として心拍に伴う血管の拍動や呼吸運動によるアーチファクトが考えられる。PDIの血管腔は心周期における最大内径を反映をしている。このため、PDIでの狭窄度は内頸動脈狭窄部、遠位部とも血管拡張期より算出しているのに対し、DSAでは造影剤注入時の狭窄度を反映している。このため、血管拍動が観察できるCFDIの狭窄度の方がよりDSAと相関していたと考えられる。また、PDIでは画像構成に時間の要素が加わっているため、内腔描出の精度を高めるには空間解像度を高めるだけでなく、呼吸や心周期に同調したサンプリングが必要である。

今回報告したように超音波画像単独ではDSA計測値との相関が低く、手術のような侵襲的処置の確定診断はできない。このため、超音波検査の目的は非侵襲的な外来スク

リーニングとして脳梗塞ハイリスク患者の治療方針の決定におくのが妥当である⁵⁾。この目的のためには、診断のしすぎ (false positive) は手術決定のための脳血管撮影で除外できるが、診断の見落とし (false negative) は治療方針を誤ることになるため最小にしなければならない。すなわち検査の specificity より sensitivity を優先させるべきである¹²⁾。超音波検査で false negative を減らすためには従来の B モード画像、狭窄部の peak flow velocity や CFDI の乱流をモニターすると共に、PDI も併せて行い特に低エコー粥腫に注意すべきである。これらの多面的な検査を一連として同時におこなえるのが超音波検査の大きな利点であり、その超音波検査に、PDI という新たな特徴をもった検査法を追加することにより超音波検査の信頼性をさらに高めることができる。また、現在開発がすすめられている経静脈投与超音波造影剤を使用しても血管描出能が向上するが、PDI は造影剤を必要としないので外来スクリーニングの手段として特に有用である。さらに PDI データをワークステーションに取り込むことにより血管内腔の 3 次元表示や血管内腔の内視像 (virtual endoscopy) も報告されており⁴⁾、診断精度を向上させるための今後の発展が期待される。

MRA では乱流成分の flow void は弱く検出され、順流成分の少ない部分の内腔は実際より狭く描出される。このため、実際は狭窄ではなく総頸動脈分岐部血管の蛇行であったのに MRA で狭窄と判定された例を経験した。CFDI でも内腔描出が不十分で false positive とでたが、PDI では乱流にもかかわらず内腔を同定できるのでプローブの方向を工夫し、血管の長軸と短軸を描出することにより蛇行と診断できる。本例では MRA で蛇行部より遠位の flow void は正常であったり、超音波 B モードでも蛇行部血管壁に粥腫を疑わすエコーの不均一さがみられなかった。このような間接所見に注目することで非侵襲的検査の診断精度を高めることが可能である。さらに、false negative を防止するためヘリカル CT を追加するなど慎重な対応が必要なのは当然である。

PDI と CFDI は同じ血流ドプラ情報を異なる処理方法で数値化、画像化したものであり、血流や血管に関する異なる情報がボタンを押すだけで容易に得ることができる。内頸動脈狭窄症における非侵襲的スクリーニング法である PDI と CFDI とは相互に異なる情報が画像化されており、どちらがすぐれているかという優劣の関係ではなく、まして PDI 単独で診断精度が向上するわけではない。従来の B モードや CFDI だけでなく PDI の特徴もよく理解したうえで、互いに統合し補完して頸動脈病変を診断することにより、超音波検査の信頼性を高めていかなければなら

い。頸部超音波検査は外来診察の合間に繰り返し施行可能な便利な非侵襲的検査であり、PDI を併せて実施することにより超音波診断の臨床的信頼性が向上するので報告した。

文 献

- 1) Barnet H, Barnes R, Robertson J: The uncertainties surrounding carotid endarterectomy. *JAMA* 268: 3120-3121, 1992
- 2) European Carotid Surgery Trialists' Collaborative Group: MRC European Carotid Surgery Trial: interim results for symptomatic patients with severe (70-99%) or with mild (0-29%) carotid stenosis. *Lancet* 337: 1235-1243, 1991
- 3) Griewing B, Morgenstern C, Driesner F, Kallwellis G, Walker ML, Kessler C: Cerebrovascular disease assessed by color-flow and power Doppler ultrasonography. *Stroke* 27: 95-100, 1996
- 4) 橋本 浩, 沈雲, 大橋俊之: Power Doppler Image を用いた超音波 3 次元画像. *超音波医学* 22: 741-744, 1995
- 5) Health and Public Policy Committee, American College of Physicians: Diagnostic evaluation of the carotid arteries. *Ann Intern Med* 109: 835-837, 1988
- 6) Moneta GL, Edwards JM, Chitwood RW, Taylor LM, Lee RW, Cummings CA, Porter JM: Correlation of North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial (NASCET) angiographic definition of 70% to 99% internal carotid artery stenosis with duplex scanning. *J Vasc Surg* 17: 152-159, 1993
- 7) North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial Collaborators: Beneficial effect of carotid endarterectomy in symptomatic patients with high-grade carotid stenosis. *N Engl J Med* 325: 445-453, 1991
- 8) Ogata J, Masuda J, Yutani C, Yamaguchi T: Rupture of atheromatous plaque as a cause of thrombotic occlusion of stenotic internal carotid artery. *Stroke* 21: 1740-1745, 1990
- 9) Riles T, Eidelman E, Litt A, Pinto R, Oldford F, Schwartzberg G: Comparison of magnetic resonance angiography, conventional angiography, and duplex scanning. *Stroke* 23: 341-346, 1992
- 10) Steinke W, Meairs S, Ries S, Hennerici M: Sonographic assessment of carotid-artery stenosis - comparison of power Doppler imaging and color Doppler flow imaging. *Stroke* 27: 91-94, 1996
- 11) Suwanwela N, Can U, Furie KL, Southern JF, Macdonald NR, Ogilvy CS, Hansen CJ, Buonanno FS, Abbott WM, Koroshetz WJ, Kistler JP: Carotid Doppler ultrasound criteria for internal carotid artery stenosis based on residual lumen diameter calculated from En Bloc carotid endarterectomy specimens. *Stroke* 27: 1965-1969, 1996
- 12) Wilterdink JL, Feldmann E, Easton JD, Ward R: Performance of carotid ultrasound in evaluating candidates for carotid endarterectomy is optimized by an approach based on clinical outcome rather than accuracy. *Stroke* 27: 1094-1098, 1996