

機能検査

菅野 範英

要 旨：静脈機能検査では、逆流と閉塞の二つの病態を評価する必要がある。侵襲的な静脈圧測定が長く静脈機能評価のゴールドスタンダードとされてきたが、無侵襲検査にその地位を引き継ぎつつある。逆流のスクリーニングにはドブラ法が、部位の特定にはデュプレックス法が有用である。プレチスモグラフィでは定量的な評価が可能である。このような無侵襲検査の普及にはCVTの養成が急務である。(J Jpn Coll Angiol, 2009, 49: 207-212)

Key words: ambulatory venous pressure, plethysmography, continuous wave Doppler, duplex ultrasonography

はじめに

血管は全身の組織への栄養供給を司る臓器であるため、血管疾患の評価には画像検査の他に機能検査が不可欠である。低圧系である静脈には、逆流防止のための静脈弁と血液駆出のための筋ポンプという二つの特徴が存在するため、病態を理解するためには、閉塞とともに逆流を評価することが重要である。

静脈圧測定

古くから行われている静脈機能検査のゴールドスタンダードであるが、侵襲的な検査であるため、徐々に無侵襲検査にその地位を譲りつつある。

足背の静脈に刺入した21ゲイジの翼状針に、圧トランスジューサーを接続し、まず立位安静時の静脈圧を測定する。足背の皮静脈圧は、下腿の筋ポンプを作用させることで低下し、安静を保つことにより前値に回復していく。下腿の筋ポンプを作用させて低下した足背の皮静脈圧をambulatory venous pressure(AVP)と称する。健常人では足背の皮静脈圧は筋ポンプ作用により安静時の20～40%に低下し、AVPは25mmHg前後に落ち着く。筋ポンプを作用させる方法としては、つま先立ち運動10回(1秒に1回のペースで)や下腿筋のミルキング10回などがあ

る。下腿筋ポンプ作用により低下した静脈圧は、健常人では動脈からのインフローに依存して徐々に回復していくが、静脈弁不全を有する症例では静脈血の逆流により急激に回復するので、筋ポンプ作用終了後前値に復するまでの時間：静脈再充満時間(venous refilling time: VRT or RT)は、静脈弁不全の定量的指標として有用である。ただし、静脈圧回復曲線は前値に徐々に復し、前値に回復した時点を明瞭に示すことが困難であるため、筋ポンプ作用によって低下した静脈圧が50%あるいは90%まで回復するのに要した時間を示す50%再充満時間(t/2)や90%再充満時間(90% RT)が使用されることが多い。

腸骨静脈領域の閉塞性病変の評価には、大腿静脈圧測定も行われる。仰臥位で測定した大腿静脈圧と中心静脈圧の差が5mmHg以上ある場合は、中枢側静脈に有意な閉塞性病変があり、外科的血行再建が必要と報告されている¹⁾。

プレチスモグラフィ

プレチスモグラフィは臓器や全身の容量の変化(通常は、臓器中の血液や空気量の変化)を測定する検査法で、脈波法と訳される。下肢の静脈機能検査法としては、ストレーンゲージ脈波、光電脈波、空気脈波などが用いられてきたが、日本では保険点数が算定できないこ



Figure 1 Attachment of probe of digital photoplethysmography.

ともあって、一般には普及していない。

いずれの脈波法でも、筋ポンプ作用と逆流、静脈流出路障害の評価ができるが、後述するように光電脈波はその原理から皮膚表面の血液量を評価しているため、深部静脈よりも表在静脈の機能評価に向いている。また、空気脈波法はメーカーのホームページにも記載があるように、下腿の容量変化を測定するので、交通枝不全の評価には適していない。

(1)筋ポンプ脈波法(muscle pump plethysmography)

足関節の背屈底屈運動やつま先立ち運動により、下腿の筋ポンプを働かせることによって、下腿筋ポンプによる駆出される血液量や、駆出されずに下腿に残存する血液量を測定する。筋ポンプ作用により下腿の静脈血が空虚になった後の再充満過程を記録することにより、静脈弁不全の重症度が定量的に評価できる。

(2)静脈圧迫脈波法(venous occlusion plethysmography)

下腿を挙上することによって、下腿の静脈を虚脱させた後に、大腿に装着したカフを80mmHg程度(動脈血流を遮断しない)に加圧して静脈血流を遮断することにより、下腿の最大容量を測定する。その後、大腿のカフを

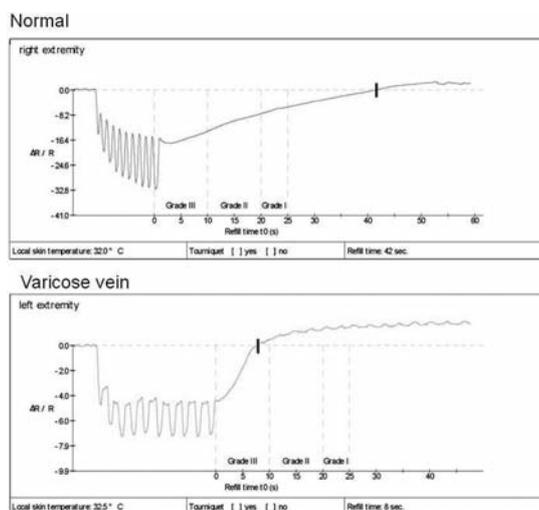


Figure 2 Recording data of digital photoplethysmography.

急速に減圧させた時の下腿の容量変化から、流出路(腸骨静脈)の抵抗を測定する。

(3)光電脈波法(PPG: photoplethysmography)

近赤外光は体表面から2~3mmまで透過し、特に700~800nmの波長はヘモグロビンによく吸収されるため、近赤外光を皮膚表面に照射し、その反射光を測定することで、体表面近くの血液量変化を測定することができる。

筋ポンプ脈波法では光電脈波のプロブは内顆の2~3cm近位に貼り付けられ(Fig. 1)、筋ポンプを作用させるため、座位での足関節背屈底屈運動または立位でのつま先立ち運動を10回繰り返す。光電脈波曲線は、AVPと同様に筋ポンプの作用により低下した後に再充満を示す。再充満までの時間をrefilling time(RT)と称するが、正常では20秒以上で、静脈弁不全が存在すると短縮する(Fig. 2)。光電脈波法は、体表面近くの血液量の変化を測定する検査であるため、深部静脈よりも表在静脈弁不全による変化をより鋭敏に反映する。

静脈圧迫脈波法では、患者は検査する下肢を挙上した臥位とし、プロブを下腿に装着する。大腿部に装着したカフを80mmHgで2分間加圧した後、圧迫を急激に解除する。圧迫解除1秒後から2秒後のPPGシグナルの変化を、VO(venous outflow)とする。光電脈波シグナルを校正することはできないので、絶対値として表現で



Figure 3 Sensing cuff attachment of air plethysmography.

きず、PPG% /minとして表される。健康人のVOは30% /minを超える。血行動態的に有意な深部静脈血栓症や腫瘍などによる外部からの圧迫があると、VOは減少する。

(4)空気脈波法(APG: air plethysmography)

空気脈波法では、長さ35cmのカフを下腿全体に装着し、下腿全体の容積変化を記録する。APGの装置にはシリンジが接続されており(Fig. 3)、カフを下腿に装着した状態で、シリンジから50ccの空気をカフに追加し、カフ内の圧変化を容量変化に換算できるように校正できるため、下腿全体の容量変化を絶対値としてとらえることができる。

筋ポンプ脈波法では、患者を仰臥位とし枕の上に踵を乗せて下肢の力を抜かせ、カフ圧が安定するまで、安静を保たせる(Fig. 3)。次に、カフが周囲に当たらないように注意しながら、立位に体位変換する。この際、片足加重でも安定するようにFig. 4に示すような専用の支持台を使用する。立位に体位変換すると下腿静脈に血液が充満してプラトーに達する。基線からのプラトーまでの容量変化がVV(venous volume)である。VVの90%まで充満するのに要した時間を90% VRT(venous refilling time)とし、90% VVを90% VRTで除したVFI(venous filling index)が静脈逆流の定量的な指標として有用である(Fig. 5)。VFIは正常では2ml/s未満である。VFIは一般的に逆流の良い指標であるとされており、HaradaらはVFI > 7ml/minは、静脈性潰瘍に対して感度73%、特異度100%、陽性予測力100%であったと報告している²⁾。

次に、つま先立ち運動をまず1回だけ行わせる。この時の容量変化がEV(expelled volume)である(Fig. 5)。EV



Figure 4 Tip-toe exercise (APG)

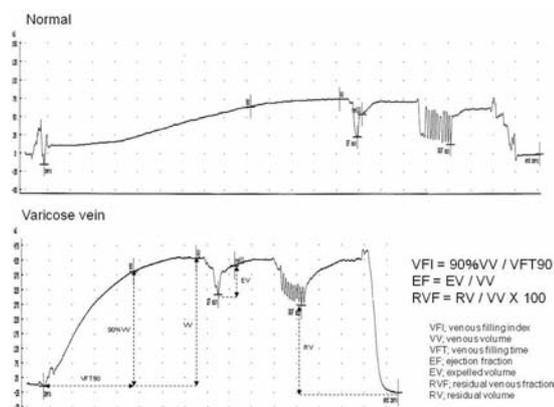


Figure 5 Findings of muscle pump air plethysmography.

は当初、単独またはVFIと組み合わせることで静脈性潰瘍の良い指標になると報告されたが、その後、慢性静脈不全の重症度と相関しないとの報告³⁻⁵⁾もあり、一般的な指標にはなっていない。

EV測定後、記録曲線が安定してから、つま先立ち運動を10回繰り返させる。このとき、駆出されずに残った血液量の指標が、RV(residual venous volume)で、RVをVVで除した値を100倍した数値を、RVF(residual venous



Figure 6 Venous occlusion air plethysmography.

fraction)とする(Fig. 5)。RVFは当初、AVPと相関すると報告されたが、その後相関しないとの報告^{3,5)}もあり、EV同様に一般的な指標とはなっていない。

静脈圧迫脈波法では、患者を仰臥位とし、Fig. 6のごとく検査する下肢を枕に乗せて若干挙上して安静を保つ。センシングカフを下腿に装着し、大腿部に幅10～12cmの圧迫用カフを装着する。圧迫用カフを80mmHg前後に加圧すると、動脈血は流入するが、静脈血が灌流しないため、下腿の容量が増加する。プラトーに達した時点で、圧迫用カフを急激に除圧すると、静脈血が灌流してFig. 7のような記録曲線が得られる。基線からプラトーまでをVC(venous capacitance)とし、圧迫解除後1秒間に灌流される容量を V_1 (one second outflow)とする。静脈灌流の指標としては OF_1 (outflow fraction at one second)が用いられるが、深部静脈のみの灌流を評価するためには、大伏在静脈を膝関節レベルで用指的に圧迫して測定が行われる。Kalodikiらは表在静脈を圧迫して測定した OF_1 が28%未満であることは、膝関節より近位静脈の深部静脈血栓症に関して、感度95%、特異度96%、陽性予測力92%、陰性予測力98%であったと報告している⁶⁾。

(5) ストレインゲージ脈波法

ストレインゲージ脈波法では、インジウムガリウムが満たされた内径1mmのシリコンチューブ(ストレインゲージ)を下腿遠位に巻き付ける。シリコンチューブの両端にはリードワイヤーが接続されており、ここから弱い電流を流すことで、シリコンチューブの抵抗を測定する。ストレインゲージにはその長さとの抵抗に直線的な相関関係があるため、下腿の容量変化に伴ってストレインゲージが伸び縮みすると、ストレインゲージの長さの変化を電気抵抗の変化として測定することができる。

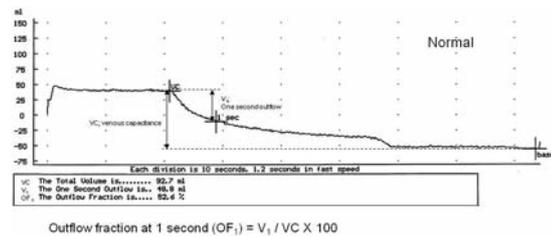


Figure 7 Findings of venous occlusion air plethysmography.

Ambulatory strain gauge plethysmography(ASGP)は、立位のまま、下腿の容積変化を評価する筋ポンプ脈波法である。体位変換しないので、静脈再充満時間に影響を与えるvenoarteriolar reflexによる毛細血管前細動脈の収縮が誘発されない。ストレインゲージは、下腿筋収縮によるアーチファクトを避けるため、足関節直上に装着し、20回の膝の屈伸運動(膝関節を60度まで屈曲する)を、2秒ごとに行う。静脈再充満時間の他に、電気的に校正することにより、足関節運動を1回行ったときに駆出される血液量(EV)が測定できる。ASGPとAVPの相関係数は、RTに関しては0.91と良好であるが、EVに関しては0.41と相関が低い⁷⁾。

超音波ドプラ法

移動している物体に超音波を当てると、ドプラ効果により周波数が変化した反射波が観測できることから、血流が測定できる。ドプラ法には、連続波ドプラ法とパルスドプラ法がある。連続波ドプラでは、照射した超音波ビーム上にあるすべての移動する物体のドプラシフトが観測されるが、パルスドプラでは、関心領域を任意に設定することが可能である。パルスドプラ法に関しては、次項Duplex法で詳しく解説する。

連続波ドプラ法により、静脈疾患では逆流の定性的評価が可能である。鼠径部では大伏在静脈または大腿静脈の弁不全の有無を、膝窩部では小伏在静脈、膝窩静脈または腓腹静脈の逆流の有無を確認できる。検査は一般的には立位で行う。検査する側の下肢は膝を若干屈曲させて加重させないで、検査しない下肢に加重させる。鼠径部または膝窩部にドプラプローブを体表面に約45度の角度であて、下腿のミルキングを行う。静脈の血流音が良好に聴取できるようにプローブの位置を調整してから、再度下腿を圧迫し、静脈音を確認する。正常では、突然

圧迫を解除しても血流音が生じないが、静脈弁不全があると圧迫解除時にも静脈血流音が確認できる。連続波ドプラは装置が比較的廉価で簡単に検査が施行できるため、静脈弁不全のスクリーニングに適しているが、表在静脈と深部静脈の逆流を鑑別するのが困難であるので、外科的治療に移行する場合には、所見をDuplex法で確認する必要がある。

Duplex法

Duplex法では、パルスドプラを用いることで、特定の関心領域の血流を確認できるため、連続波ドプラと異なり、表在静脈、深部静脈、交通枝の弁不全を鑑別することが可能である。検査の体位は、連続波ドプラと同様に検査側の下肢に荷重をかけないようにして立位で行うが、高齢者や肥満患者では、転倒の危険があるため、座位で検査を行ってもよい。静脈の逆流は下腿のミルキングで、2方向性の血流を確認することで確認される。これは、パルスドプラモードの波形でも確認できるが、カラーモードでより簡便に確認することができる。一般的に逆流が0.5秒以上持続するものが弁不全とされる⁸⁾。

近年、Duplex法で逆流の指標を表す試みが報告されているが、逆流時間は臨床症状やAVPと相関せず⁹⁾、逆流速度や逆流量はAVPと相関する¹⁰⁾ものの、測定や計算が煩雑であり未だ研究段階である。再現性を良くするためには、逆流誘発方法として、下腿のミルキングの代わりにcuff inflator/deflatorの使用が勧められるが、残念ながら日本においては普及していないのが現状である。

臨床での応用

下肢静脈機能評価のゴールドスタンダードは静脈圧測定であったが、足背静脈穿刺の侵襲が大きいため、静脈撮影とともにその地位を無侵襲検査に譲りつつある。

弁不全の存在診断は、ドプラ法にてスクリーニングを行い、Duplex法にてその部位を確定できる。逆流量の量的評価は、プレチスモグラフィーで行うことができ、静脈再充満時間やVFIが臨床上に有用な指標となる。

静脈の閉塞性病変の存在診断は、画像検査に頼ることになる。閉塞の程度は、膝関節より近位のみを機能的に評価することが可能で、プレチスモグラフィーによる流出路検査にて測定されるVOが、閉塞の機能的な重症度の指標となる。

おわりに

静脈疾患の評価には、画像検査と機能検査の両輪が必要である。いずれも無侵襲検査法が確立されているが、残念ながら現状では日常臨床において十分活用されているとは言い難い。このような検査が臨床現場に十分浸透するためには、Vascular Laboの充実が必要不可欠であろう。このためには各施設における血管診療技師(CVT: Clinical Vascular Technologist, 血管診療技師認定機構ホームページ<http://plaza.umin.ac.jp/~cvt/>参照)の養成が急務と考えられる。

文 献

- 1) Gloviczki P, Pairolero PC, Toomey BJ et al: Reconstruction of large veins for nonmalignant venous occlusive disease. *J Vasc Surg*, 1992, **16**: 750–761.
- 2) Harada RN, Katz ML, Comerota A: A noninvasive screening test to detect “critical” deep venous reflux. *J Vasc Surg*, 1995, **22**: 532–537.
- 3) Criado E, Farber MA, Marston WA et al: The role of air plethysmography in the diagnosis of chronic venous insufficiency. *J Vasc Surg*, 1998, **27**: 660–670.
- 4) Ting AC, Cheng SW, Wu LL et al: Air plethysmography in chronic venous insufficiency: clinical diagnosis and quantitative assessment. *Angiology*, 1999, **50**: 831–836.
- 5) Nishibe T, Kudo F, Miyazaki K et al: Relationship between parameters of air plethysmography and types of superficial venous reflux in patients with primary varicose veins. *Int Angiol*, 2008, **27**: 385–388.
- 6) Kalodiki E, Calahoras LS, Delis KT et al: Air plethysmography: the answer in detecting past deep venous thrombosis. *J Vasc Surg*, 2001, **33**: 715–720.
- 7) Struckmann JR: Assessment of the venous muscle pump function by ambulatory strain gauge plethysmography. Methodological and clinical aspects. *Dan Med Bull*, 1993, **4**: 460–477.
- 8) Sarin S, Sommerville J, Farrah J et al: Duplex ultrasonography for assessment of venous valvular function of the lower limb. *Br J Surg*, 1994, **81**: 1591–1595.
- 9) Rodriguez AA, Whitehead CM, McLaughlin RL et al: Duplex-derived valve closure times fail to correlate with reflux flow volumes in patients with chronic venous insufficiency. *J Vasc Surg*, 1996, **23**: 606–610.
- 10) Neglén P, Egger JF 3rd, Olivier J et al: Hemodynamic and clinical impact of ultrasound-derived venous reflux parameters. *J Vasc Surg*, 2004, **40**: 303–310.

Functional Examination

Norihide Sugano

Division of Vascular Surgery, Department of Surgery, Tokyo Medical and Dental University Hospital Faculty of Medicine,
Tokyo, Japan

Key words: ambulatory venous pressure, plethysmography, continuous wave Doppler, duplex ultrasonography

Venous functional examinations need to evaluate both reflux and occlusion. The invasive venous pressure measurement has been the gold standard for the venous functional test; however, non-invasive examinations are becoming more common. The Doppler examination is useful for screening the reflux, and then Duplex identifies the location of the reflux. Plethysmography offers quantification of the reflux and obstruction. It is now important that we increase the number of Clinical Vascular Technologists as soon as possible to popularize such non-invasive examinations in Japan.

(J Jpn Coll Angiol, 2009, **49**: 207–212)