

## エアープレチスモグラフィ(空気脈波法)

小川 智弘 星野 俊一

**要 旨**：空気脈波法は空気を媒体として下腿の容量変化を測定することで、無侵襲的に下肢動静脈還流機能を定量的に評価し得る検査であり、特に静脈機能検査においては静脈逆流、静脈閉塞および下腿筋ポンプ機能が測定可能であり、日常臨床に広く普及しつつある。動脈血流検査では動脈流入量の測定が可能であり、末梢動脈疾患の重症度や術後の改善度の評価が試みられている。( J Jpn Coll Angiol, 2005, 45: 323-328 )

Key words: air plethysmography, chronic venous insufficiency, quantitative venous function, arterial inflow

### はじめに

末梢血管疾患に対する脈波法は下肢の血流動態を機能的に評価できる方法として広く臨床応用されている。脈波法にはインピーダンス脈波、ストレインゲージ脈波、光電脈波、水置換脈波、空気脈波などがあるが、そのうち空気脈波は、四肢動静脈血流の機能診断を定量的にできる特徴をもち、日常臨床に普及してきている。本稿ではその器械の構造、種々の血流パラメーターの特徴および血管疾患に対する利用法を中心に文献的考察を加えて報告する。

### 空気脈波法の変遷

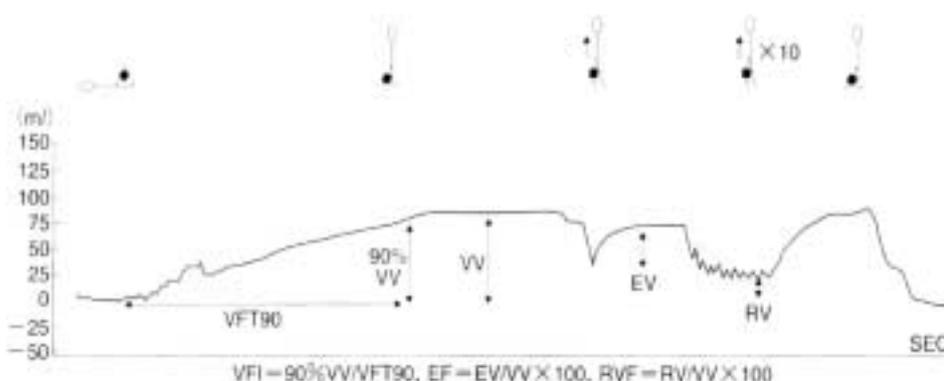
空気脈波法はpulse volume recorderを備えたsegmental air plethysmographyが動脈脈波形を記録することで動脈血流の評価が行われていたが<sup>1)</sup>、1970年代より空気が入ったスリーブ圧の変化を測定することができるようになり、カフ圧迫負荷をかけることで、機能的静脈容積(venous volume: VV)、最大静脈流出量(outflow: OF)を算出し、静脈機能診断に応用されるようになった<sup>2)</sup>。現在使用されている空気脈波装置は、1980年代にChristopoulosとNicolaidisらにより、動静脈血流の有用な機能診断として確立されたものである<sup>3,4)</sup>。

### 空気脈波装置の原理

現在日常臨床で使用されている空気脈波装置は、下腿や上肢を被う塩化ビニル性の空気カフ、半導体圧センサーおよび増幅解析装置からなる。まず、下腿および上肢に巻かれたカフは6mmHgが掛かる圧まで膨らまされる。次に100mlの空気を注入して圧変化のキャリブレーションを行い、圧センサーから送られた信号を解析装置にかけて、容量に変換する仕組みとなっている。圧変化と空気注入量の関係をみた報告では、大きいサイズのカフでは少ない容量変化は捉えにくい傾向にあり<sup>3)</sup>、このことは測定する部位の容量に応じたカフ(現在市販されているカフは3L~4Lの4種類あり)を選択することが重要であることと、容量変化が少ない場合は過小評価される可能性があることを示唆している。また空気容量は温度に影響されやすく、一定の室温で検査されることはもちろん、被検者の体温にてカフ内の温度が変化することも考えられ、キャリブレーションに時間をかけることも必要である。

### 空気脈波による静脈還流機能検査

空気脈波では下肢全体の静脈逆流および静脈閉塞を定量的に測定できる特徴をもつ。静脈逆流の測定法は一般的にChristopoulosらによるプロトコールが使用されている<sup>4)</sup>。まず、被検者は臥位となり、足を45度挙上



**Figure 1** The protocol of air plethysmography for the examination of venous reflux and calf muscle pump function.  
VFT: venous filling time

させて、下腿容積を虚脱させ、機能的ゼロ状態にする。その後立位となり、下腿静脈容積を完全に充滿させることで、VVを測定後、1回をつま先立ち、さらに10回をつま先上げ運動を行うことで、下腿筋ポンプによる1回駆出量(ejection volume: EV)と運動後の残存容積(residual volume: RV)を測定する。最後に再度下肢を挙上し、下腿容積の機能的ゼロ状態に戻し、終了する。この検査では被検者の協力のもとに施行するため、検査法を被検者に理解させることが重要である。さらにこの過程をスムーズに行うための工夫もなされている<sup>5,6)</sup>。これらのデータを利用して、静脈逆流指標とされる90%VVに達するまでの時間で、90%VVを除いた静脈充滿係数(venous filling index: VFI)、1回駆出率(ejection fraction:  $EF = EV/VV$ )および残存容積率(residual volume fraction:  $RVF = RV/VV$ )が算出される(Fig. 1)。

VVはChristopoulosらのプロトコールによると、算出される指標の基本となっている<sup>4)</sup>。VV自体は一次性下腿静脈瘤の場合では正常肢と比較し、増大する。しかしながら、二次性下腿静脈瘤の場合は閉塞病変も加味されることもあり、ばらつきが多い<sup>3)</sup>。

VFIは時間あたりの静脈逆流量を示す代表的な量的指標とされている。Nicolaidisらは、VFIが増大すると、静脈性浮腫、色素沈着および静脈潰瘍の頻度が増加し、その正常範囲は2ml/secと報告している<sup>7)</sup>。CriadoらはVFIによる静脈逆流検出に対する感度が98.2%、特異度が80%と報告している<sup>8)</sup>。

また、VFIの増大とCEAP分類のC Class<sup>9)</sup>や症状と関

連が認められるとの報告もあり<sup>6,10-12)</sup>、VFIは量的逆流指標としての信頼度は高い。

1回EFは筋ポンプ作用を表す指標とされているが、静脈性潰瘍を伴う慢性静脈不全ではEFの低下が認められ<sup>13)</sup>、Nicolaidisらは静脈潰瘍の発生率がEFとVFIの組み合わせと関係があり、EF60%以上を正常と報告している<sup>14)</sup>。しかし本邦では正常人のEFは平均47.9%であり、欧米と比較しては低値である<sup>15)</sup>。さらに加齢にてEFは減少するとも報告されている<sup>16)</sup>。

RVFは運動時静脈圧とよく相関し( $r = 0.76$ )、静脈逆流、閉塞を含めた全体的な下腿筋ポンプ機能を反映する指標として使われているが、静脈閉塞を伴う場合は静脈圧と相関は低いとの報告もある<sup>17)</sup>。RVF30%以下では静脈潰瘍は認められず、RVFが高値を示すにつれて静脈潰瘍の発症率が増加することが報告されている<sup>18)</sup>。

### 静脈閉塞の測定法

下腿静脈閉塞の検査では被検者が臥位の状態で足に枕をおいて15cm足を挙上)で大腿を70mmHgで駆血し、静脈容量(venous capacity: VC)が最大になった際に急に駆血を解除し、VCが元に戻るまで観察する。

解除後最初の1秒間のVC減少率から静脈OFを算出する。静脈閉塞があるとOFは低値を示すが、表在静脈を圧迫しない状態では38%以上が正常値とされている。この測定による深部静脈閉塞の診断は感度が95%、特異度が96%と良く、腸骨大腿静脈に及ぶ中枢型血栓が膝窩静脈以下に限局する下腿型血栓より高度の閉塞を示すことも報告されているが<sup>19)</sup>、下腿血栓の診断率は

低いとの報告も認められる<sup>20)</sup>。

上肢静脈閉塞の測定では、測定肢を45度に挙上した状態で吊り、前腕にセンシングカフを巻き、上腕を駆血、解除することで、下肢同様の静脈流出指標を測定、算出し、正常OF64%に対し、血栓症患者では23%と、有意に血栓症患者で低値を示すことが報告されている<sup>21)</sup>。

その他、空気脈波法による容量変化の測定と同時に末梢の静脈圧を測定し、静脈血流抵抗を算出し、慢性静脈閉塞の重症度判断が試みられている<sup>14)</sup>。

### 動脈流入量の測定法

ストレインゲージ脈波や部分的空気脈波にても動脈流入量の測定が行われているが、下腿全体をカバーする空気脈波はその感度を増加している<sup>22)</sup>。

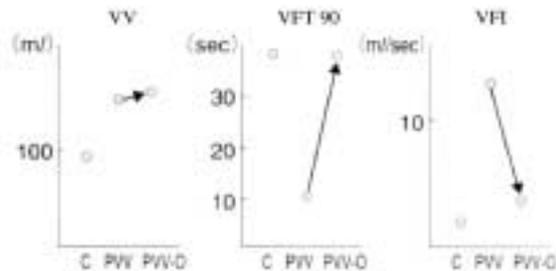
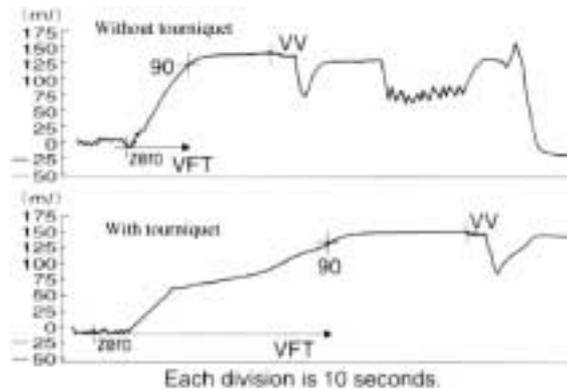
下肢の動脈流入量はセンシングカフを下腿に巻き、膝上で70mmHgまで駆血し、それ以後20秒間の下腿の容積増加から測定される。この空気脈波は静脈還流機能の測定が主要な役割であるため、動脈血流機能評価では幅広い臨床応用がないものの、閉塞性動脈硬化症では正常に比し、動脈流入量が減少することやバイパス術後や血管形成術後に動脈流入量が増加することが報告されている<sup>23, 24)</sup>。

### 空気脈波法の再現性

空気脈波法による定量的評価において再現性を考慮することは重要である。また、静脈は容量血管であるため、そのバリエーションは大きく、正常人でも夕方になれば、静脈機能が悪化することも報告されている<sup>25)</sup>。空気脈波法による指標においては、報告によりばらつきがあるものの、約10%誤差は生じている<sup>26, 27)</sup>。このため空気脈波法による指標を経時的観察する場合は誤差を考慮に入れる必要がある。

### 空気脈波による慢性静脈不全の診断法

一般診察にて下肢静脈瘤や下肢の腫脹が認められる際に、下肢全体の静脈還流機能を評価する目的で広く使用される。一次性静脈瘤の場合はVVの増加とVFIの高値を示すが、EF、RVFは正常である場合が多く<sup>28)</sup>、深部静脈逆流、不全穿通枝、皮膚うっ滞症状や静脈潰瘍を伴う場合は筋ポンプ作用を示すEFが低値で、RVFが高値を示すことが多い<sup>29)</sup>。大腿部にターニケットを



**Figure 2** The air plethysmographic evaluation of varicose vein with great saphenous vein reflux.  
C: control, PVV: primary varicose vein, PVV-O: primary varicose vein-occlusion

巻き、表在性の静脈逆流をブロックすると、VFIが改善することで表在性静脈瘤の診断ができる( Fig. 2 )。一方膝窩静脈に逆流を有するものでは、ターニケットの効果は認められない。しかしながら、小伏在静脈逆流の程度の評価は困難な欠点もある。

二次性静脈瘤の場合はさらに静脈閉塞によるOFの低下を認めることが多い( Fig. 3 )。

リンパ浮腫などを伴う場合はVVの低値とともにVFIが高値を示すこともあり、血管エコーを併用し、静脈逆流の有無、皮下の増大を確認する必要がある<sup>30)</sup>。

慢性静脈不全症の外科的適応において、一次性伏在静脈瘤やその他の表在静脈瘤に対する外科的治療法は低侵襲で、効果が比較的はっきりしているものの、深部静脈逆流閉塞に対する治療は侵襲度が高いため、重症症例に限られることが多く、このような症例に対する空気脈波法による下腿全体の静脈還流機能の評価は治療法選択に有用である。

空気脈波法は慢性静脈不全症に対する術前診断だけでなく、治療後の経過観察にも幅広く使用されてい

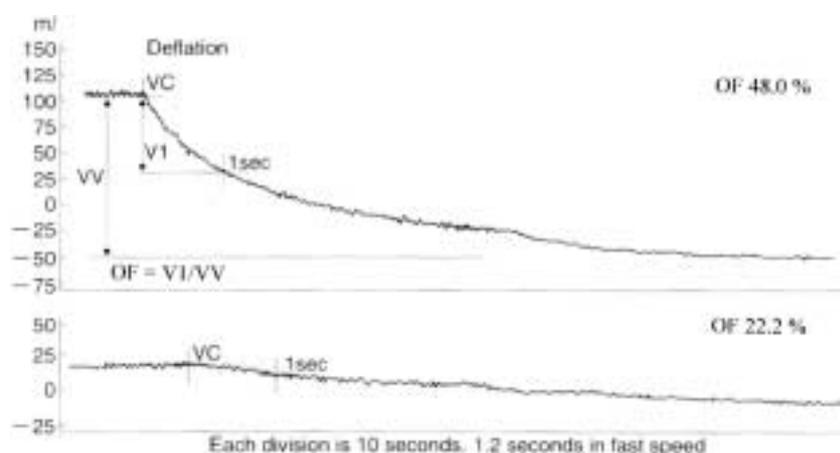


Figure 3 The air plethysmographic evaluation of chronic deep vein thrombosis with ilio-femoral vein occlusion.

る。慢性静脈不全症に対する弾力性ストッキングの静脈機能評価に利用されたり<sup>4)</sup>、下肢静脈瘤硬化療法や外科的治療後に空気脈波法による指標が有意に改善し<sup>31-34)</sup>、空気脈波法による評価と術後の臨床評価との関連が認められると報告されている<sup>35)</sup>。さらに術後の下肢静脈瘤の再発も、VFIの増大により予測できるとも報告されている<sup>36)</sup>。

### 空気脈波法と他の静脈機能評価法との比較

光電脈波法との比較では、空気脈波法はより臨床的な静脈逆流の評価ができるといった報告がある一方で<sup>26, 28)</sup>、臨床的重症例と軽症例の診断において、空気脈波法が大きな利点を伴うことはなかったとの報告もある<sup>37)</sup>。

血管エコーとの比較では、血管エコーによる個々の静脈逆流時間の総和と空気脈波法でのVFIとの相関を示す報告があるものの<sup>38)</sup>、必ずしも一致して静脈不全の重症度を反映するものではなく、両者を併用することでその診断精度は高まると考えられる<sup>39)</sup>。

静脈圧との比較ではRVFが静脈圧に良好な相関関係を示すものの、再現性においては、空気脈波法で劣るとの報告されている<sup>40)</sup>。

### まとめ

空気脈波法は無侵襲的に下肢全体の静脈閉塞、逆流、筋ポンプ機能を定量的に評価することができる特

徴をもつことから、特に静脈疾患に対する機能評価法として有用である。しかしながら、他の脈波法に比し、やや煩雑で時間もかかることもあり、さらに正確に血流を評価するためには、測定環境を一定にする必要がある。また、個々の血管の評価は困難なことが多く、その場合は血管エコー、静脈造影などを組み合わせて、検査精度を高める必要がある。

### 文 献

- 1) Barnes RW, Thornhill B, Nix L et al: Prediction of amputation wound healing. Roles of Doppler ultrasound and digit photoplethysmography. Arch Surg, 1981, 116: 80-83.
- 2) Nicholas GG, Miller FJ, Demuth WE Jr et al: Clinical vascular laboratory diagnosis of deep venous thrombosis. Ann Surg, 1977, 186: 213-215.
- 3) Christopoulos DC, Nicolaidis AN, Malouf GM et al: Absolute blood volume changes in the lower limb using airplethysmography. In Negus D, Jantet G, eds. Phlebology '85. John Libbey, London, 1986, 356-359.
- 4) Christopoulos DC, Nicolaidis AN, Szendro G et al: Airplethysmography and the effect of elastic compression on venous hemodynamics of the leg. J Vasc Surg, 1987, 5: 148-159.
- 5) 真野修江, 渡辺俊明, 伊与田義信 他: 下肢静脈疾患の機能的検査法 vascular technologistの立場から. 第17回血管無侵襲診断法研究会誌, 1997: 17-18.
- 6) 飛田研二, 黒瀬公啓, 塩澤寛敏 他: 空気容積脈波法を

- 用いた静脈機能評価 健康肢，一次性下肢静脈瘤肢，深部静脈血栓症肢の比較 . 静脈学，2002，**13**：7-12 .
- 7 )Nicolaidis AN, Christopoulos DC: Methods of quantitation of chronic venous insufficiency, Venous disorders, W.B.Saunders, Philadelphia, 1991, 77-90.
- 8 )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.
- 9 )Classification and grading of chronic venous disease in the lower limbs, A consensus statement . 静脈学，1995，**6**：103-108 .
- 10 )Neglen P, Raju S: A rational approach to detection of significant reflux with duplex Doppler scanning and air plethysmography. J Vasc Surg, 1993, **17**: 590-595.
- 11 )Weingarten MS, Branas CC, Czeredarczuk M et al: Distribution and quantification of venous reflux in lower extremity chronic venous stasis disease with duplex scanning. J Vasc Surg, 1993, **18**: 753-759.
- 12 )McDaniel HB, MarstonWA, Farber MA et al: Recurrence of chronic venous ulcers on the basis of clinical, etiologic, anatomic, and pathophysiologic criteria and air plethysmography. J Vasc Surg, 2002, **35**: 723-728.
- 13 )Araki CT, Back TT, Padberg FT et al: The significance of calf muscle pump function in venous ulceration. J Vasc Surg, 1994, **20**: 872-879.
- 14 )Nicolaidis AN, Sumner DS, eds. Investigation of Patients with Deep Vein Thrombosis and Chronic Venous Insufficiency. Med-Orion Publishing, CA, 1991, 39-43.
- 15 )久保田義則，天野幾司，浅岡伸光 他：Air plethysmographyを用いた静脈検査の正常範囲 . 第17回血管無侵襲診断法研究会誌，1997：21-22 .
- 16 )Schina MJ Jr, Neumyer MM, Healy DA et al: Influence of age on venous physiologic parameters. J Vasc Surg, 1993, **18**: 749-752.
- 17 )Welkie JF, Kerr RP, Katz ML et al: Can noninvasive venous volume determinations accurately predict ambulatory venous pressure? The Journal of Vascular Technology, 1991, **15**: 186-190.
- 18 )Christopoulos D, Nicolaidis AN, Szendro G: Venous reflux: quantification and correlation with the clinical severity of chronic venous disease. Br J Surg, 1988, **75**: 352-356.
- 19 )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.
- 20 )Kalodiki E, Nicolaidis AN: Air-plethysmography for the detection of acute DVT: new criteria. Vasc Surg, 1997, **31**: 123-129.
- 21 )Gardner GP, Cordts PR, Gillespie DL et al: Can air plethysmography accurately identify upper extremity deep venous thrombosis? J Vasc Surg, 1993, **18**: 808-813.
- 22 )Comerota AJ, Harada RN, Eze AR et al: Air plethysmography: a clinical review. Int Angiol, 1995, **14**: 45-52.
- 23 )Nicolaidis AN, Labropoulos N, Volteas N et al: Quantitative air-plethysmography in the management of arterial ischemia. In Bernsein EF ed. Noninvasive Diagnostic Techniques in Vascular Disease, 4th ed. CV Mosby, St Louis, 1993, 544-546.
- 24 )正木久男，稲田 洋，森田一郎 他：Air plethysmographyによる下肢閉塞性動脈硬化症の虚血肢の評価 . 脈管学，1999，**39**：787-795 .
- 25 )Katz ML, Comerota AJ, Kerr RP et al: Variability of venous-hemodynamics with daily activity. J Vasc Surg, 1994, **19**: 361-365.
- 26 )Bays RA, Healy DA, Atnip RG et al: Validation of air plethysmography, photoplethysmography, and duplex ultrasonography in the evaluation of severe venous stasis. J Vasc Surg, 1994, **20**: 721-727.
- 27 )Yang D, Vandongen YK, Stacey MC: Variability and reliability of air plethysmographic measurements for the evaluation of chronic venous disease. J Vasc Surg, 1997, **26**: 638-642.
- 28 )小川智弘，星野俊一，佐戸川弘之 他：種々の脈波法による静脈機能評価に対する検討 . 第17回血管無侵襲診断法研究会誌，1997：15-16 .
- 29 )Nicolaidis AN: Investigation of chronic venous insufficiency: a consensus statement. Circulation, 2000, **102**: E126-163.
- 30 )小川智弘，星野俊一，佐戸川弘之 他：静脈機能検査によるリンパ浮腫の評価 . 静脈学，1997，**8**：176.
- 31 )Gillespie DL, Cordts PR, Hartono C et al: The role of air plethysmography in monitoring results of venous surgery. J Vasc Surg, 1992, **16**: 674-678.
- 32 )Welch HJ, McLaughlin RL, O'Donnell TF Jr: Femoral vein valvuloplasty: Intraoperative angioscopic evaluation and hemodynamic improvement. J Vasc Surg, 1992, **16**: 694-700.
- 33 )Bry JD, Muto PA, O'Donnell TF et al: The clinical and hemodynamic results after axillary-to-popliteal vein valve transplantation. J Vasc Surg, 1995, **21**: 110-119.
- 34 )Sakuda H, Nakaema M, Matsubara S et al: Air plethysmographic assessment of external valvuloplasty in patients with

- valvular incompetence of the saphenous and deep veins. *J Vasc Surg*, 2002, **36**: 922–927.
- 35 Owens LV, Farber MA, Young ML et al: The value of air plethysmography in predicting clinical outcome after surgical treatment of chronic venous insufficiency. *J Vasc Surg*, 2002, **32**: 961–969.
- 36 van Rij AM, Jiang P, Solomon C et al: Recurrence after varicose vein surgery: a prospective long-term clinical study with duplex ultrasound scanning and air plethysmography. *J Vasc Surg*, 2003, **38**: 935–943.
- 37 Welch HJ, Faliakou EC, McLaughlin RL et al: Comparison of descending phlebography with quantitative photoplethysmography, air plethysmography, and duplex quantitative valve closure time in assessing deep venous reflux. *J Vasc Surg*, 1992, **16**: 913–920.
- 38 Weingarten MS, Czeredarczuk M, Scovell S et al: A correlation of air plethysmography and color-flow-assisted duplex scanning in the quantification of chronic venous insufficiency. *J Vasc Surg*, 1996, **24**: 750–754.
- 39 van Bemmelen PS, Mattos MA, Hodgson KJ et al: Does air plethysmography correlate with duplex scanning in patients with chronic venous insufficiency? *J Vasc Surg*, 1993, **18**: 796–807.
- 40 Lunzer MM, Hotvedt PS, Dietz CA Jr et al: Limb Venous Hemodynamic Function: Relative Reproducibility of Standard Tip-Toe Exercise and Treadmill Walking Exercise Techniques. *The Journal of Vascular Technology*, 1997, **21**: 31–38.

## Air Plethysmography - A Clinical Review

Tomohiro Ogawa and Shunichi Hoshino

Cardiovascular Disease Center, Fukushima Daiichi Hospital, Fukushima, Japan

---

**Key words:** air plethysmography, chronic venous insufficiency, quantitative venous function, arterial inflow

Air plethysmography is a non-invasive medical technique which quantifies the function of venous and arterial flow by measuring changes in calf volume. In addition to the ability to examine arterial inflow in evaluating an arterial function, air plethysmography is capable of studying venous reflux, obstruction of venous outflow, and the calf muscle pump function in assessing a venous function. Moreover, its capabilities range from making diagnoses of venous and arterial diseases prior to treatment, to following up arterial and venous functions after treatment.

(*Jpn Coll Angiol*, 2005, **45**: 323–328)