◆ 総 説 ◆

下肢静脈血行動態の特性から見た 深部静脈血栓症

安部 力, 田中邦彦, 森田啓之*

安部 力

Property of lower limb venous hemodynamics and risk for deep venous thrombosis

Chikara ABE, Kunihiro TANAKA, Hironobu MORITA*

平成17年3月 九州大学歯学部卒業
平成17年4月 岐阜大学大学院医学系研究科
入学 生理機能学分野(森田
啓之教授)入局
平成20年3月 同大学院卒業
博士(医学)取得
平成20年4月 日本学術振興会特別研究員
(PD)

Key words: deep venous thrombosis, lower limbs blood flow, lower limbs blood velocity, compression stocking, intermittent pneumatic compression, muscle contraction, neuromuscular electrical stimulation

はじめに

長時間の着座姿勢により, 下肢深部静脈に血栓が形成され, その血栓により肺動脈血栓塞栓症が引き起こされることは「エコノミークラス症候群(旅行者血栓症)」として, 古くから知られている^{1)~3)}. 近年の交通手段の発達により海外への渡航頻度が増加していることで, 深部静脈血栓症を発症するリスクはますます増加していると考えられる. Scurr らの報告によると, 8時間以上のフライトを経験した116人を対象にして深部静脈血栓症の発症を調査した結果, 12人の被験者, すなわち10%の被験者に無症候性ではあるが深部静脈の血栓形成が確認された⁴⁾. また地震災害時においても, 住居の崩壊により長期間の車中泊を余儀なくされることによって, 深部静脈血栓症の発症が増加するという報告がある⁵⁾⁶⁾.

古くより, 血栓の形成は, Virchowの3要素により説明されている. すなわち, 血流うっ滞, 血管壁損傷, 血液凝固能亢進によって血栓の形成を説明することができる. このうち, 長

時間の着座姿勢による深部静脈血栓症発症とも関係が深いのは静脈血流うっ滞, すなわち血流速度の低下である⁷⁾. 座位の姿勢では下肢の血流速度が減少し, 膝窩静脈の断面積が増加することがよく知られている^{8)~11)}. 座位の状態では, 心臓と下肢の間で高さの差が生じ, 静水圧差が増加して下肢の静脈圧が増加する. 静脈は非常にコンプライアンスの高い臓器であり, 静脈圧上昇は静脈容積増大を招き, 下肢静脈の断面積が増加する¹²⁾. 深部静脈の血流量(=血流速度×血管断面積)が変化しなければ, 血管断面積増加に伴い血流速度は低下する. 本稿では, 着座姿勢によって引き起こされる血行動態の変化と, 静脈血流うっ滞を解消する方法を紹介する.

1. 着座姿勢による下肢血流うっ滞

足底部-座面間の距離と膝窩静脈の最大血流速度, 平均血流速度, 血管断面積, 血流量の関係を図1に示す. 座面の位置が高くなるにつれて, 最大血流速度および平均血流速度

*岐阜大学医学部生理学〔〒501-1194 岐阜県岐阜市柳戸1-1〕

Department of Physiology, Gifu University Graduate School of Medicine〔501-1194 Yanagido, Gifu, Japan〕

Tel: 058-230-6300 Fax: 058-230-6302 e-mail: zunzunmorita@gmail.com

図1 足底部と座面との高さの差 (Height) が膝窩静脈の最大血流速度 (Vmax), 平均血流速度 (TAVmax), 血管断面積 (Area), 血流量 (Flow) に与える影響。

が減少し、一方断面積は増加することがわかる。また、血流量は一定に保たれたままである。Delis らの報告でも同様に、座位では臥位に比べ、大腿静脈および膝窩静脈の最大血流速度と平均血流速度は減少し、血管断面積は増加した⁹⁾。また両部位の血流量は一定に保たれたままであった⁹⁾。

次に、一般的なシートとオットマンタイプのシートに着座した時の血流速度および血管断面積の違いを図2に示す¹³⁾。臥位から座位への姿勢変換により、心臓と下肢の高低差が80~90 cm になると、膝窩静脈の断面積は約5倍に増加し、血流速度は約20%に低下する。この現象は、座位を維持した120分にわたって見られた。一方、オットマンタイプのシートに着座して、上体をリクライニングし下肢を挙上した場合、心臓と下肢の高低差が約40 cm となり、膝窩静脈の血流うっ滞は大きく改善された。

下肢と心臓の高さの差が大きくなると、下肢

静脈の静水圧が増加し、下肢静脈圧が増大すると考えられる。実際、着座の状態では足底部の静脈圧は約60 mmHg になっているという報告がある¹⁴⁾。この結果、圧の増大によって血管断面積が増加し、血流速度が低下する。着座の状態における血流速度の低下は、下肢静脈における血流うっ滞を招き、深部静脈血管内に血栓を形成するリスクを高める。例えば、同じ航空機の中でシートに座っている状態でも、ファーストクラスおよびビジネスクラスのシートのようなオットマン搭載のシートでは、エコノミークラスのシートに比べて、下肢静脈内の血流速度低下が少なく、深部静脈血栓症発症のリスクが低くなると考えられる。しかし、長時間の渡航を行う人のうち、その多くはエコノミークラスのような一般的なシートを利用するため、一般的なシートに着座した状態でも下肢血流うっ滞を改善する策が必要となる。

旅行者血栓症ばかりではなく、術中・術後の

図2 一般的なシートとオットマンタイプのシートに着座した時の血流速度および血管断面積。

深部静脈血栓症も問題となっている。もし深部静脈血栓症の予防策を講じない場合、術後7日から10日で、股関節置換術後では45~57%, 膝関節置換術後では40~84%, 大腿骨頸部骨折手術後では36~60%の割合で深部静脈血栓症の発症が認められるという報告がある¹⁵⁾。また、股関節置換術後では0.1~0.4%, 膝関節置換術後では0.2~0.7%, 大腿骨頸部骨折手術後では3.6~12.9%の割合で致死的な肺血栓塞栓症が生じるという報告がある¹⁵⁾。さらに、これら深部静脈血栓症や肺血栓塞栓症の発症リスクは、術後3~6週間に渡っても高いままである¹⁶⁾。従って、退院後も家庭でできる予防策を講じる必要があると考えられる。

2. 下肢血流うっ滞の改善策

長時間の着座姿勢や術後に引き起こされる深部静脈血栓症を防ぐために様々な方法が行われている。その代表例としては、(1) 弾性ストッキングによる圧迫、(2) 外部からのエアコンプレッションによる圧迫、(3) 神経筋肉電気刺激による下肢の筋ポンプ活性化、(4) 抗凝固薬を利用した方法が挙げられる。(4)は最も効果的と考えられているが、医師の関与が必要で

あり、航空機内や家庭での使用に煩わしさが伴う。本稿では(1)-(3)の方法による深部静脈血栓症予防の効果を挙げる。

2.1. 弾性ストッキングによる効果

弾性ストッキングは、下肢にうっ滞した血液を外部からの圧迫によって心臓へ還流させる、あるいは浅在静脈から深部静脈へ血液をシフトさせるために用いられている¹⁸⁾⁻²¹⁾。弾性ストッキングは、足首部の圧が最も高くなっており、膝部にかけて圧が徐々に小さくなっていき、この圧格差によって静脈血液が遠位側から近位側に流れるような仕組みになっている²¹⁾²²⁾。欧州では、ストッキングからの圧の大きさによって弾性ストッキングがクラス分けされている¹⁹⁾: Grade I mild (15-21 mmHg), Grade II moderate (23-32 mmHg), Grade III strong (34-46 mmHg), Grade IV very strong (>49 mmHg)。入院患者における深部静脈血栓症予防としては、足首部に15-20 mmHgの圧がかかるのが適切だと考えられており、また、外来患者に対しては20-30 mmHgの圧が適切だと考えられている¹⁹⁾。

Aguらは、弾性ストッキングが深部静脈血栓症を防ぐメカニズムとして次のような提案を行っている²¹⁾。弾性ストッキングを使用することにより、(1) 静脈血流速度が増加²³⁾、(2) 静脈血管径が減少²⁴⁾、(3) 静脈血管壁を介する経壁圧(静脈内圧-静脈外圧)が減少²²⁾、(4) 外部からの圧迫による静脈弁機能の改善²⁵⁾。実際臨床では、病院患者において、弾性ストッキングを装着した場合、深部静脈血栓症の発症割合を27%から13%に減少させるという報告があり、弾性ストッキングと他の予防策を併用することで約4%にまで発症リスクを抑えることができるという報告がある²⁶⁾。また、8時間以上のフライトにおいても、弾性ストッキングを装着することによって深部静脈血栓症の発症リスクを有意に抑えることができるという報告もある⁴⁾²⁷⁾。

図3 (左図) 超音波診断装置による臥位の状態 (Prone) と座位の状態 (Sitting) の血流。(右図) 座位の状態における、下腿の自発収縮時 (Spontaneous contraction) と神経筋電気刺激 (NMES) の血流速度。

2.2. 間欠的空気圧迫法の効果

間欠的空気圧迫法は、外部から空気圧を与えることによって、機械的に静脈血のうっ滞を解消することを目的とした方法であり、下腿だけを圧迫する方法、下腿と大腿を圧迫する方法、足裏を圧迫する方法がある^{28)~31)}。Lurieらの報告によると、着座時の膝窩静脈の最大血流速度が6.2 cm/sに対して、随意的に足を動かした場合は、最大血流速度が28 cm/s、間欠的空気圧迫装置を使用した場合は、血流速度が約21 cm/sにまで増加した³²⁾。この結果から、いかに間欠的圧迫装置が効果的かわかる。この間欠的空気圧迫法は、他の深部静脈血栓症予防方法と併用するとさらに効果的であるという報告もある。英国ではFour-layer bandageが静脈潰瘍の予防として標準的に使用されており、この

図4 下肢血流速度 (Vmax) に対する神経筋電気刺激 (NMES) の効果。

方法と間欠的空気圧迫法の併用効果を Kalodikiらは報告している³³⁾。膝窩静脈の最大血流速度は、Four-layer bandageを使用しない場合で8.4 cm/s、Four-layer bandageを使用した場合で13 cm/s、Four-layer bandageと間欠的空気圧迫法を併用した場合で27 cm/sとなった。さらに、間欠的空気圧迫法は、機械的に血流速度を増加させることで血栓の形成を防ぐだけでなく、血

中の血液凝固系・線溶系にも影響を与えると
いう報告もある³⁴⁾。Comerota らによると, 180
分間の間欠的空気圧迫法を行った場合, 血中の
tPA は有意に増加し, 一方 PAI-1 は有意に減少
した³⁴⁾。

2. 3. 電気刺激による効果

外部からの電気刺激による筋収縮を利用し,
下肢静脈の血流速度を増加させることで下肢血
流うっ滞を解消する方法もある^{35) 36)}。下肢血流
速度に対する神経筋電気刺激の効果の典型例を
図 3 に示す。臥位の状態では膝窩静脈の最大
血流速度が 30 cm/s に対し, 座位の状態では 6
cm/s にまで低下した (図 3 左図)。この状態
で下腿の筋肉を自発収縮すると, 最大血流速
度は約 100 cm/s まで増加し, 神経筋電気刺激
では約 40 cm/s にまで増加した (図 3 右図)。
また, 21 人の被験者を対象にした膝窩静脈に
おける神経筋電気刺激の効果を図 4 に示す¹³⁾。
電気刺激を行わない場合, 膝窩静脈の最大血
流速度は約 7 cm/s に対して, 電気刺激を行う
と最大血流速度は約 20 cm/s まで増加した¹³⁾。
Clarke Moloney らも同様に, 起立時における
膝窩静脈の最大血流速度は 7.3 cm/s に対して,
下肢の電気刺激によって血流速度は 15 cm/s に
まで増加したと報告している³⁷⁾。外部から電気
刺激を行う場合は, 効果はもちろんのことなが
ら被験者に疼痛を感じさせるようなものであつ
てはならない。そのためには, (1) 電気刺激の
パラメータ, (2) 電極の大きさ, (3) 電極の貼
付場所, が重要となる³⁸⁾。これら 3 つの要素を
考慮しながら, 下肢の静脈血流に対する効果を
上げる必要があると考えられる。

おわりに

本稿ではこれまで, 深部静脈血栓症発症予防
として, (1) 弾性ストッキング, (2) 間欠的
空気圧迫法, (3) 神経筋電気刺激, の 3 つを挙
げてきた。深部静脈血栓症の発症リスクは航空

機内だけではなく, 術中・術後や災害時でも高
く, これら 3 つの方法は場所を選ばず使用する
ことができる。各予防法を上手に使い分けて,
深部静脈血栓症の発症を予防していく必要があ
ると考えられる。

文 献

- 1) Geroulakos G : The risk of venous thromboembolism from air travel. *Bmj* **322** : 188, 2001.
- 2) Kelman CW, Kortt MA, Becker NG, Li Z, Mathews JD, Guest CS, Holman CD : Deep vein thrombosis and air travel : record linkage study. *Bmj* **327** : 1072, 2003.
- 3) Schwarz T, Siegert G, Oettler W, Halbritter K, Beyer J, Frommhold R, Gehrich S, Lenz F, Kuhlisch E, Schroeder HE, Schellong SM : Venous thrombosis after long-haul flights. *Arch Intern Med* **163** : 2759-2764, 2003.
- 4) Scurr JH, Machin SJ, Bailey-King S, Mackie IJ, McDonald S, Smith PD : Frequency and prevention of symptomless deep-vein thrombosis in long-haul flights : a randomised trial. *Lancet* **357** : 1485-1489, 2001.
- 5) Yokota T, Kojima S, Yamauchi H, Hatori M : Regional medicine following a large earthquake : economy-class syndrome. *Disaster Manag Response* **4** : 3, 2006.
- 6) Inoue K : Venous thromboembolism in earthquake victims. *Disaster Manag Response* **4** : 25-27, 2006.
- 7) Ansell JE : Air travel and venous thromboembolism—is the evidence in? *N Engl J Med* **345** : 828-829, 2001.
- 8) Ashby EC, Ashford NS, Campbell MJ : Posture, blood velocity in common femoral vein, and prophylaxis of venous thromboembolism. *Lancet* **345** : 419-421, 1995.
- 9) Delis KT, Knaggs AL, Sonecha TN, Zervas V, Jenkins MP, Wolfe JH : Lower limb venous haemodynamic impairment on dependency : quantification and implications for the “economy class” position. *Thromb Haemost* **91** : 941-950, 2004.
- 10) Essandoh LK, Duprez DA, Shepherd JT : Postural cardiovascular reflexes : comparison of responses of forearm and calf resistance vessels. *J Appl Physiol* **63** : 1801-1805, 1987.
- 11) Shvartz E, Gaume JG, White RT, Reibold RC : Hemodynamic responses during prolonged sitting. *J Appl Physiol* **54** : 1673-1680, 1983.
- 12) Guyton AC, Hall JE. *Textbook of Medical Physiology*. eleventh edition ed. Amsterdam : Elsevier saunders, 2006.
- 13) Morita H, Abe C, Tanaka K, Shiratori M, Oguri M, Shiga T : Neuromuscular electrical stimulation and an ottoman-type seat effectively improve popliteal venous flow in a sitting position. *J Physiol Sci* **56** : 183-186, 2006.
- 14) Delis KT, Slimani G, Hafez HM, Nicolaides AN : Enhancing venous outflow in the lower limb with intermittent pneumatic compression. A comparative haemodynamic analysis on the effect of foot vs. calf vs. foot and calf compression. *Eur J Vasc Endovasc Surg* **19** : 250-260, 2000.
- 15) Geerts WH, Heit JA, Clagett GP, Pineo GF, Colwell CW, Anderson FA, Jr., Wheeler HB : Prevention of venous thromboembolism. *Chest* **119** : 132S-175S, 2001.
- 16) White RH, Romano PS, Zhou H, Rodrigo J, Bargar W : Incidence and time course of thromboembolic outcomes following total hip or knee arthroplasty. *Arch Intern Med*

- 158 : 1525-1531, 1998.
- 17) Cotter LA, Arendt HE, Cass SP, Jian BJ, Mays DE, 2nd, Olsheski CJ, Wilkinson KA, Yates BJ : Effects of postural changes and vestibular lesions on genioglossal muscle activity in conscious cats. *J Appl Physiol* **96** : 923-930, 2004.
 - 18) Jamieson R, Calderwood CJ, Greer IA : The effect of graduated compression stockings on blood velocity in the deep venous system of the lower limb in the postnatal period. *Bjog* **114** : 1292-1294, 2007.
 - 19) Lord RS, Hamilton D : Graduated compression stockings (20-30 mmHg) do not compress leg veins in the standing position. *ANZ J Surg* **74** : 581-585, 2004.
 - 20) Hsieh HF, Lee FP : Graduated compression stockings as prophylaxis for flight-related venous thrombosis : systematic literature review. *J Adv Nurs* **51** : 83-98, 2005.
 - 21) Agu O, Hamilton G, Baker D : Graduated compression stockings in the prevention of venous thromboembolism. *Br J Surg* **86** : 992-1004, 1999.
 - 22) Horner J, Fernandes J, Fernandes E, Nicolaides AN : Value of graduated compression stockings in deep venous insufficiency. *Br Med J* **280** : 820-821, 1980.
 - 23) Meyerowitz BR, Nelson R : Measurement of the Velocity of Blood in Lower Limb Veins with and without Compression. *Surgery* **56** : 481-486, 1964.
 - 24) Sarin S, Scurr JH, Coleridge Smith PD : Mechanism of action of external compression on venous function. *Br J Surg* **79** : 499-502, 1992.
 - 25) Lewis CE, Jr., Antoine J, Mueller C, Talbot WA, Swaroop R, Edwards WS : Elastic compression in the prevention of venous stasis. A critical reevaluation. *Am J Surg* **132** : 739-743, 1976.
 - 26) Amaragiri SV, Lees TA : Elastic compression stockings for prevention of deep vein thrombosis. *Cochrane Database Syst Rev* : CD001484, 2000.
 - 27) Belcaro G, Geroulakos G, Nicolaides AN, Myers KA, Winford M : Venous thromboembolism from air travel : the LONFLIT study. *Angiology* **52** : 369-374, 2001.
 - 28) Santori FS, Vitullo A, Stopponi M, Santori N, Ghera S : Prophylaxis against deep-vein thrombosis in total hip replacement. Comparison of heparin and foot impulse pump. *J Bone Joint Surg Br* **76** : 579-583, 1994.
 - 29) Wilson NV, Das SK, Kakkar VV, Maurice HD, Smibert JG, Thomas EM, Nixon JE : Thrombo-embolic prophylaxis in total knee replacement. Evaluation of the A-V Impulse System. *J Bone Joint Surg Br* **74** : 50-52, 1992.
 - 30) Nicolaides AN, Miles C, Hoare M, Jury P, Helms E, Venniker R : Intermittent sequential pneumatic compression of the legs and thromboembolism-deterrent stockings in the prevention of postoperative deep venous thrombosis. *Surgery* **94** : 21-25, 1983.
 - 31) Tarnay TJ, Rohr PR, Davidson AG, Stevenson MM, Byars EF, Hopkins GR : Pneumatic calf compression, fibrinolysis, and the prevention of deep venous thrombosis. *Surgery* **88** : 489-496, 1980.
 - 32) Lurie F, Kistner RL, Eklof B, Tsukamoto JK : Prevention of air travel-related deep venous thrombosis with mechanical devices : active foot movements produce similar hemodynamic effects. *J Vasc Surg* **44** : 889-891, 2006.
 - 33) Kalodiki E, Ellis M, Kakkos SK, Williams A, Davies AH, Geroulakos G : Immediate hemodynamic effect of the additional use of the SCD EXPRESS Compression System in patients with venous ulcers treated with the four-layer compression bandaging system. *Eur J Vasc Endovasc Surg* **33** : 483-487, 2007.
 - 34) Comerota AJ, Chouhan V, Harada RN, Sun L, Hosking J, Veermansunemi R, Comerota AJ, Jr., Schlappy D, Rao AK : The fibrinolytic effects of intermittent pneumatic compression : mechanism of enhanced fibrinolysis. *Ann Surg* **226** : 306-313; discussion 313-304, 1997.
 - 35) Faghri PD, Van Meerdevort HF, Glaser RM, Ficoni SF : Electrical stimulation-induced contraction to reduce blood stasis during arthroplasty. *IEEE Trans Rehabil Eng* **5** : 62-69, 1997.
 - 36) Kaplan RE, Czyrny JJ, Fung TS, Unsworth JD, Hirsh J : Electrical foot stimulation and implications for the prevention of venous thromboembolic disease. *Thromb Haemost* **88** : 200-204, 2002.
 - 37) Clarke Moloney M, Lyons GM, Breen P, Burke PE, Grace PA : Haemodynamic Study Examining the Response of Venous Blood Flow to Electrical Stimulation of the Gastrocnemius Muscle in Patients with Chronic Venous Disease. *Eur J Vasc Endovasc Surg* : 2005.
 - 38) Lyons GM, Leane GE, Grace PA : The effect of electrical stimulation of the calf muscle and compression stocking on venous blood flow velocity. *Eur J Vasc Endovasc Surg* **23** : 564-566, 2002.