

## 運動における静脈血管応答から健康づくりを考える

Health promotion from the aspect of the venous vascular response to exercise

大上 安奈\*

### 1. はじめに

我が国では世界でも類を見ないほどに高齢化が急速に進んでおり、1970年には高齢化率がわずか7%であったのが、1995年には14%を超え、さらに2010年には23.0%となり、超高齢化社会に突入している。医療制度や生活保障制度、学校教育の充実が、平均寿命を延伸させた結果ともいえるが、このような平均寿命の延伸は健康問題をより複雑化し、多様化させている。そのため、現代では単に長く生きる期間よりも、健康かつ元気に活躍できる期間、つまり、健康寿命の延伸が重要であると考えられている。生活習慣病の発症を予防し、健康寿命を延伸するためには、栄養・食生活、身体活動・運動、休養、飲酒、喫煙および歯・口腔の健康に関する生活習慣の改善が重要であるとされており、これらについては改善すべき目標項目とその数値が設定されている<sup>1)</sup>。本講演では特に運動による静脈血管応答や適応に着目し、健康づくりについて考えてみたい。

### 2. 運動時の血液循環システムと静脈血管の役割

#### 2. 1 運動時に生じる体内での生体応答

身体を動かすということを生理学的に考えてみると、『骨格筋の収縮と弛緩を繰り返す』と表現することができる。身体活動・運動に伴う骨格筋収縮を維持するためには、多くのエネルギー、つまりATPを産生する必要がある。そのために体内では、循環器系、呼吸器系、神経系および内分泌系などの多くの系統が働きを活性化させており、それらが適切に統合されることで運動の継続が可能となっている。ここでは特に、循環器系の働きに焦点を当てる。

#### 2. 2 循環器系の概要

循環器系は血液を循環させる閉鎖回路となっており、

心臓と血管系から構成されている。血管はおもに、動脈、静脈そして毛細血管に分類される。体内に存在する血液はおおよそ体重の8%とされており、成人で約5Lとなり、この血液が安静時には約1分間で全身を一巡する。血管の特性上、安静状態では静脈血管系に全血液量の60~70%が存在するとされている。

ここで、心拍出量とは、心臓から送り出される1分間当たりの血流量を示したものであり、成人の安静時の心拍出量は、おおよそ5L/分である。心拍出量は、身体の活動状況により変化し、さらに、全身一様に同じだけ分配されるわけではなく部位差が存在する。例えば、安静時には、心拍出量の約半分は肝臓や腎臓、消化器官に分配される。一方、運動時には活動する骨格筋で多くのATPを作る必要があるため、それに見合った酸素を供給するために心拍出量が増大し、その約80%が骨格筋に送られるようになる<sup>2)</sup>。

#### 2. 3 心拍出量を構成する要因

運動時における心拍出量は、どのような仕組みで増大するのだろうか？心拍出量は一回拍出量と心拍数の積で算出することができる。一回拍出量とは、心臓が一回拍動する時に送り出される血流量であり、心拍数とは、心臓が1分間に拍動する回数のことである。運動時には、この2つのパラメータともに増大する。

運動時の心拍数の上昇は主に交感神経活動が高まることで生じるとされている。もう一方の一回拍出量についてみてみると、一回拍出量は心室が拡張した時の容積（心室拡張末期容量）と心室が収縮した時の容積（心室収縮末期容量）の差で表すことができる。心室が収縮する時に左心室の血液が全身に送り出され、心室内の血液はほぼなくなるため、常に一回拍出量を維持するためには、次に心室が収縮するまでの期間、つまり心室の拡張

期に血液を充満させる必要がある。安静時と比較して運動時において、心室収縮末期容量はほぼ変化しないが、心室拡張末期容量は増加することが示されている。そして、この心室拡張末期容量の増加に関与しているのが、静脈還流量（静脈側から心臓側に移動する血流量）である。この静脈還流量を調節する要因として、圧勾配、筋ポンプ作用、呼吸ポンプ作用および能動的静脈血管収縮が挙げられる。

## 2. 4 静脈還流量の調節

静脈還流量の調節に関わる要因の一つ目として、圧勾配が挙げられる。動脈側と比較すると小さいが、血液を心臓に還することができるだけの圧力勾配（約 10~15 mmHg）が存在している。

要因の二つ目として筋ポンプ作用が挙げられる（図1）。骨格筋が弛緩している時には、静脈血管内に血液が貯留するが、一方で、骨格筋が収縮する時は、骨格筋が静脈血管を機械的に圧迫すると同時に、下方の弁は閉じて血液の逆流を防ぎ、上方の弁は開いて血液の流れを促進させるため、静脈血管内の血液が心臓側に移動する。つまり、静脈還流量が増加することになる。この一連の流れを、筋ポンプ作用という。特に運動時にはふくらはぎの筋肉における筋ポンプ作用に伴う静脈還流量の増加は非常に大きく<sup>3)</sup>、第二の心臓（セカンドハート）とも呼ばれている。

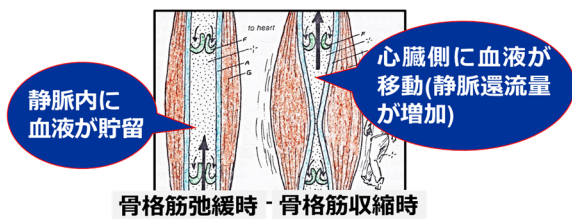


図1 筋ポンプ作用の模式図

「Kapit, Macey and Meisami. The Physiology Coloring Book. Addison Wesley Longman. 2000」より引用

次に三つ目として呼吸ポンプ作用が挙げられる（図2）。これは息を吸ったり吐いたりする動作が、静脈還流量を調節するものである。具体的には、吸気時には、肺が膨張するため胸腔内の圧力が高まり、横隔膜が下降し、腹腔内の圧力が高まる。その結果、腹部に存在する静脈

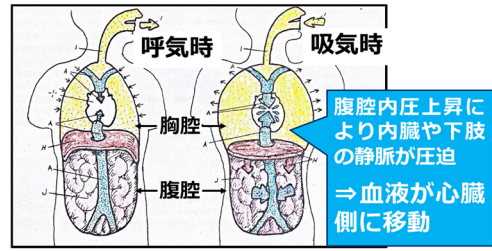


図2 呼吸ポンプ作用の模式図

「Kapit, Macey and Meisami. The Physiology Coloring Book. Addison Wesley Longman. 2000」より引用

血管が圧迫されるため、静脈血管内の血液が胸部側つまり心臓側に移動することとなり、静脈還流量が増大する。

筋ポンプ作用や呼吸ポンプ作用は、骨格筋や呼吸の働きにより、静脈が機械的に圧迫を受けることで受動的に押しつぶされ、その結果、静脈内の血液が心臓に戻されるという仕組みである。

そして四つ目が、能動的静脈血管収縮である。この能動的静脈血管収縮は、静脈血管壁に存在する平滑筋が収縮する、つまり、静脈血管自らが収縮することで、血管内の血液を心臓側に戻そうとするものである。図3は超音波法を用いて静脈血管の横断面積を映したものである。左が安静時、右が運動時を示しており、安静時と比較して運動時に静脈血管横断面積が縮小しているのが分かる。この静脈血管横断面積の低下は、運動強度に依存しており<sup>4)</sup>、交感神経系調節によるものであると考

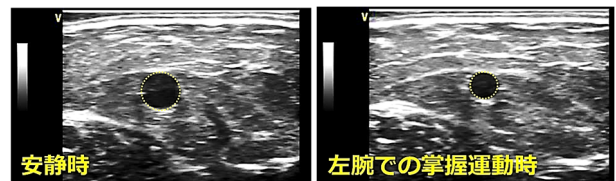


図3 超音波法による右上腕部分(対側肢)の静脈血管横断面画像

えられている。しかし、能動的静脈血管収縮が静脈還流量の増加に関与するかどうかは、一致した見解が得られていない。

以上のように、血液を全身に適切に巡らせるためには、心臓や動脈血管はもちろんであるが、静脈血管の役割も大きいといえる。

### 3. 運動に伴う静脈血管の適応

#### 3.1 静脈血管の特性

静脈は伸展性が高く血液を保持しやすいという特性を有しており、安静時には約60~70%の血液が静脈内に存在している。そして、運動時など交感神経活動が高まる場合、静脈血管は能動的に収縮し、静脈血管内の血液を心臓に還そうとする。つまり静脈は、伸展性と収縮性を兼ねそなえた血管といえる。静脈血管の収縮反応については、比較的古くから研究が行われているが、伸展性に関しては、まだまだ未解決な点が多く残されている。

#### 3.2 静脈血管伸展性の評価方法

前腕部の静脈血管伸展性を測る場合、図4の上図のように、上腕部分に加圧用のカフを巻き、前腕部にストレーンゲージを装着する。上腕部のカフに60mmHgの圧力を加え、8分間維持し、その後、1秒当たり1mmHgの割合で脱気する。ここで、カフ圧は静脈内圧とほぼ等しいことが示されているため、静脈内圧の指標として用いられている。60mmHgという圧力は、通常安静状態における動脈の拡張期血圧よりも低いが、静脈内圧よりも高いため、心臓側から前腕部へ動脈を通り血液が流入するが、前腕部から心臓側への静脈流出は阻害されることになり、このことは、前腕部に血液が貯留することを意味している。この時の前腕部容積変化を、プレチスモグラフィ法で測定し、図で表すと図4の下図のようになる。前腕部容積は、加圧の3~4分目までは急激に増大するが、その後、ほぼ一定の値となり、8分目からの

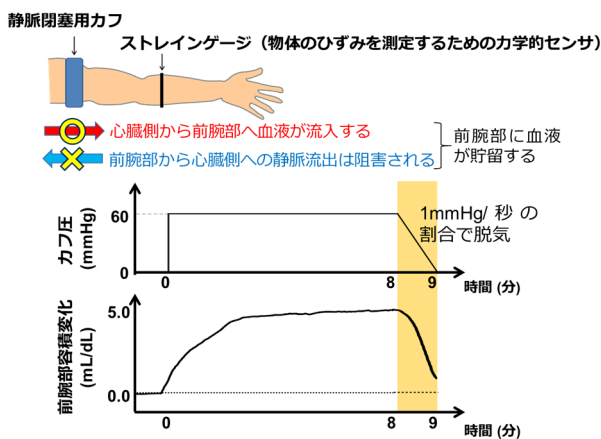


図4 脱気法を用いた静脈血管伸展性の評価

カフ圧の減圧に伴って低下していく変化を示す。なお、前述のように血液量の多くは静脈血管内に分布するこ

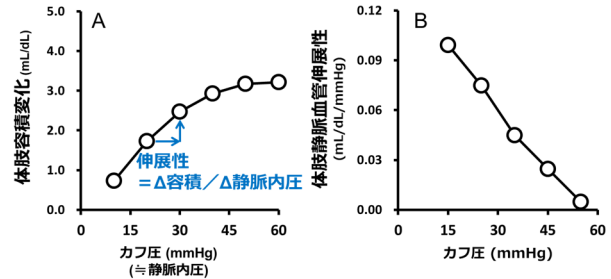


図5 カフ圧と体肢容積変化および静脈血管伸展性の関係

とから、プレチスモグラフィ法で測定した体肢容積変化は静脈血管容積を反映すると考えられている。

脱気中のカフ圧に対する前腕部容積変化をグラフにすると、図5Aのようになる。伸展性は圧力あたりの容積変化で表すことができるため、以下のような式で、伸展性を算出することができる。それをグラフで表すと図5Bのようになる。

$$\text{伸展性}_{\text{カフ圧}i} = \frac{\text{容積}_i - \text{容積}_{i-a}}{\text{カフ圧}_i - \text{カフ圧}_{i-a}}, (i, a: \text{任意の整数})$$

このプロトコールは、1999年に Halliwill ら<sup>5)</sup>が発表したものであり、カフ圧を脱気している時の容積変化をもとに伸展性を評価することから「脱気法」と呼ばれている。

#### 3.3 加齢に伴う静脈血管伸展性の低下

静脈血管伸展性と加齢の関係を検討した先行研究によると、若年者と比較して高齢者の静脈血管伸展性は低値を示すことが示されている<sup>6)</sup>。また、この加齢に伴う静脈血管伸展性の低下は、日ごろから運動習慣を有する人でも生じるものの、その低下程度は運動習慣を持たない人よりも抑えられるようである<sup>6)</sup>。さらに、このような静脈血管伸展性の低下は、高血圧症発症の要因の一つと考えられている<sup>7)</sup>。

#### 3.4 若年者における静脈血管伸展性と血圧の関連

これまでの先行研究では、高齢者や高血圧症患者など、

すでに静脈血管伸展性が低くなっている集団を対象に、血圧との関連が検討されていた。しかし、血管の健康状態が良い、つまり静脈血管伸展性が比較的高いと考えられる集団（健康な若年者など）における、静脈血管伸展性と血圧の関連は明確にはされていない。そこで我々の研究室において、若年者における静脈血管伸展性と血圧の関連を調べたところ、男性および女性ともに、静脈血管伸展性が高いほど収縮期血圧やダブルプロダクトは低くなる傾向にあることが明らかとなった<sup>8)</sup>。なお、ダブルプロダクトとは収縮期血圧と心拍数の積で表される値で、心臓の負担度を示す指標である。これらの結果から、若年期から静脈血管伸展性を高く維持することで血圧の上昇を抑えることができると考えられ、このことは、将来的な高血圧症の予防につながる可能性があるかもしれない。

### 3. 5 習慣的な持久性運動が静脈血管伸展性に及ぼす影響

ウォーキングやランニング、自転車運動といった持久性運動を2年以上習慣的に行なっている群と、運動を行なう習慣がない群を比較した場合、前者の方が静脈血管伸展性が高いことが報告されている<sup>6)</sup>。ただし、この研究は、習慣的な運動有りと無しとの群を比較した横断研究となっており、どれくらいの期間で運動効果がみられてくるのか？またどのような運動の種類が効果的なのか？までは明確にはされていない。

これまでに、高齢者<sup>9)</sup>や妊娠中毒症患者<sup>10)</sup>のように、静脈血管伸展性の低下がみられる集団に対して、一定負荷持久性運動トレーニングの影響を検討した縦断研究において、6~8週間の運動トレーニングは下腿部静脈血管伸展性を改善することが報告されている。では、静脈血管伸展性が比較的高く維持されている健康な若年者でも、同様の結果が得られるのであろうか？

そこで我々の研究室では、健康な若年者を対象に、8週間の持久性自転車運動トレーニングが静脈血管伸展性を高めるか否かを検討した<sup>11)</sup>。また、一定負荷（60%HRreserve）と間欠負荷（40%HRreserve と

80%HRreserve を2分間ずつ交互）で違いがあるかについても併せて検討した。いずれの運動負荷も、1回40分、週3回、8週間実施したところ、次のような結果が得られた。まず、トレーニング中の心拍数と自覚的運動強度（RPE）について、間欠負荷では低強度と高強度で心拍数が変動するが、両負荷の心拍数を平均すると、一定負荷とほぼ等しかった。一方、RPEは一定負荷よりも間欠負荷で高い値を示した。RPEは運動のきつさの指標であり、値が大きくなるほど、よりきつと感じていることを意味している。次に、下腿部の容積変化と静脈血管伸展性についてみてみると、下腿部容積変化は一定負荷でも間欠負荷でもトレーニング後に増大したが、下腿部静脈血管伸展性は間欠負荷運動でのみ増大が認められた（図6）。この結果は、健康な若年者でも、間欠負荷運動であれば8週間の運動トレーニングで静脈血管伸展性は増大することを示唆している。しかし、間欠負荷でのみ静脈血管伸展性増大が生じた理由までは明らかにできておらず、この点については、今後さらに検討する必要がある。

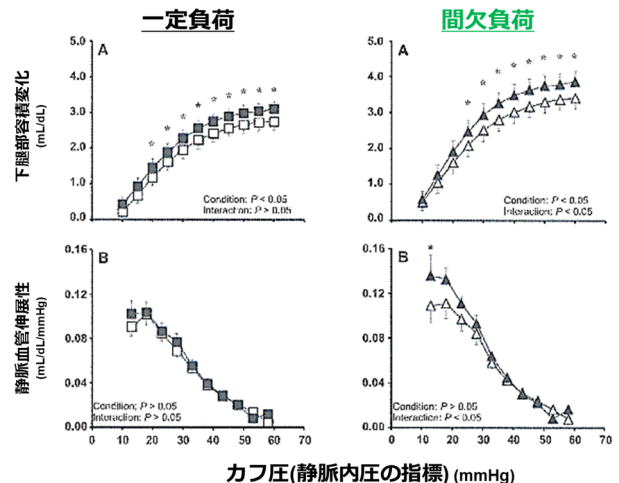


図6 トレーニング前後の下腿部の容積変化と静脈血管伸展性 □,△: トレーニング前, ■,▲: トレーニング後  
 \*: P < 0.05, トレーニング前 vs. トレーニング後<sup>11)</sup>

### 3. 6 一過性の運動が静脈血管伸展性に及ぼす影響

上述のように、習慣的な運動は静脈血管伸展性を高めるようであるが、では、運動を1回だけ行なった場合で



も静脈血管伸展性は増大するのであろうか？我々の研究室では、32 分間の自転車運動（一定負荷運動または間欠負荷運動）を行なう前と、運動 10 分後、30 分後そして 60 分後の静脈血管伸展性を検討したところ、いずれの運動負荷でも、運動前と比較して運動後の静脈血管伸展性の増大は認められなかった。この結果は、静脈血管伸展性を高めるためには、運動を継続的に行なっていくことが重要であることを意味している。

#### 4. まとめ

本講演では、先行研究や我々の研究室で行なっている研究内容をもとに、静脈血管が循環系システムに果たす役割、そして持久性運動との関係について概説した。

以上の内容をまとめると、健康な若年者でも間欠負荷運動であれば、8 週間で静脈血管伸展性は増大すること、また、静脈血管伸展性が高い人ほど血圧や心臓への負担度が低い傾向にある可能性が示唆されている。したがって、若年期のうちから習慣的に持久性運動を行ない、静脈血管伸展性を高めることが、生活習慣病、特に高血圧症の予防、ひいては健康寿命の延伸につながるかもしれない。人生 100 年といわれる現代において、自身の生活習慣を振りかえり、日常生活の中に身体活動や運動を積極的に取り入れることで、元気で健康な身体づくりを目指したいものである。

#### 参考文献

- 1) 厚生労働省: 平成 26 年度版 厚生労働白書 健康長寿社会の実現に向けて~健康・予防元年~ (2014)
- 2) Rowell LB: Human Cardiovascular Control. Oxford University Press (1993)
- 3) Stegall HF: Muscle pumping in the dependent leg. *Circ Res* 19: 180-190 (1987)
- 4) Ooue A et al.: Superficial venous vascular response of the inactive limb during static handgrip exercise at different work load in women. *J Exerc Sci* 22: 9-16 (2013)
- 5) Halliwill JR et al.: Measurement of limb venous compliance in humans: technical considerations and

- physiological findings. *J Appl Physiol* 87: 1555-1563 (1999)
- 6) Monahan KD et al.: Smaller age-associated reductions in leg venous compliance in endurance exercise-trained men. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 281: H1267-H1273 (2001)
  - 7) Safar ME & London GM: Arterial and venous compliance in sustained essential hypertension. *Hypertension* 10: 133-139 (1987)
  - 8) Oue A et al.: Association between vegetable consumption and calf venous compliance in healthy young adults. *J Physiol Anthropol* 39: 18 (2020)
  - 9) Iida H et al.: Effects of walking with blood flow restriction on limb venous compliance in elderly subjects. *Clin Physiol Funct Imaging* 31: 472-476 (2011)
  - 10) Scholten RR et al.: Aerobic exercise training in formerly preeclamptic women: effects on venous reserve. *Hypertension* 66: 1058-1065 (2015)
  - 11) Oue A et al.: Effect of short-term endurance training on venous compliance in the calf and forearm differs between continuous and interval exercise in humans. *Physiol Rep* 7: e142112019 (2019)