

位置負荷—指尖血圧応答の分析

深瀬湛子*, 前田順一**, 下田政博*, 鈴木淳一*, 竹宮 隆*

Analysis of gravity change induced finger blood pressure response

Yasuko HUKASE, Jun-ichi MAEDA, Masahiro SHIMODA, Jun-ichi SUZUKI,
and Takashi TAKEMIYA

Abstract

To evaluate the stability of finger blood pressure during exercise, we introduced a new technique of gravitational potential energy change or arm position change which elicits vascular response in finger. Experiments were performed with 9 healthy male subjects, 21-25 yrs, using a noninvasive blood pressure device, Finapres, in comparison with a photoplethysmogram (Δ DPG). Finger blood pressure decreased with arm raising and increased with arm lowering. Percent changes in finger blood pressure were proportional to the height of the arm position relative to the heart level. However, Δ DPG-P wave amplitude increased with arm raising, and decreased with arm lowering. The calculated index of arteriolar compliance (Δ DPG, amplitude/ Δ P, pulse pressure) showed a change similar to Δ DPG in relation to the arm position change.

These results suggest that the finger blood pressure should be obtained at the heart level, and that the method of arm position change may be useful in observing arteriolar myogenic response in humans. (Jpn. J. Exercise Sports Physiol. 1(1): 107~112, 1994)

key words: Arm position change, Finger blood pressure, arteriolar response

I. 緒言

血圧の非観血的連続測定に際しては、その定常及び動揺の生理的な情報が経時的に正しく観察されること及び他のパラメータとの同時計測も可能なことなどが求められる。このためには、測定のしやすい指尖部動脈の活用や基本的には心臓位置で計測を行うなどの条件が守られねばならない。運動、動作及びREM睡眠などで動的測定を行うことの多い運動生理学の領域では心臓—指尖基準位に位置的な変化

が発生しやすいことは当然考えられる。しかしながら、実際にはこの領域において上肢や下肢の運動域を想定した実験で指尖血圧の位置の変動差を検討した報告はない。

本論の目的は、第一に既に臨床的に普及している指尖型の非観血連続血圧測定装置について指尖部センサーの心臓位置からの変化に対する指尖血圧の応答を分析することにある。さらには、これと並行して得られた位置負荷—指尖容積微分脈波の結果と比

* : 筑波大学体育科学系(〒305 つくば市天王台1-1-1)

** : 宮城教育大学教育学部(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

較しながら位置負荷法の妥当性を検討しようとするものである。最終的には、位置エネルギーの変化と末梢循環の細動脈における経壁圧—血管平滑筋応答の関係を考察することにある。

II. 方法

A. 被験者

被験者は21歳から25歳の健康な成人男子9名であった。各被験者の循環系及び上肢には病的な異常が認められず、重篤な循環障害などの既往歴もなかった。被験者には実験に先立ち研究目的、実験方法などを詳細に説明し、実験参加の承諾を得た。

B. 指尖血圧の測定

指尖部の動脈血圧は、非観血連続血圧測定装置 Finapres (オメダ社製) を用いて測定した。血圧測定用のフィンガーカフは左手第2指に装着した。この装置により指尖部の収縮期血圧 (SBP) 及び拡張期血圧 (DBP) の測定を行い、さらにその脈圧 (pulse pressure : PP) 及び平均血圧 (mean blood pressure : MBP) を次式により算出し、解析に加えた。

$$PP = SBP - DBP, \quad MBP = PP/3 + DBP$$

C. 指尖容積微分脈波の測定

指尖容積脈波 (Digital photo plethysmogram : DPG) の測定には、校正脈波計 (MLV-2201, 日本光電製) を用いた。この装置は指尖部に装着するトランスデューサに光透過型を用いており、心

拍出量の変化や微小血管網の容積変動が光電変換素子を経て電氣的に記録されるようになっている。トランスデューサは左手第3指に装着した。DPGの一次微分波である指尖容積微分脈波 (Differential digital photoplethysmogram : Δ DPG) は、微分回路を内蔵する前置増幅器に DPG 出力を再導入し、時定数0.03秒で増幅して記録した。時定数は基線動揺を考慮にいたした予備実験の結果に基づいて決定されたものである。この微分波の中で、本実験が分析の対象とする波形はP波である。DPG及び Δ DPGは、1mm/secの低速度で経時的に記録した。そしてP波の振幅をP波高として、25mm/secのペーパースピードによりDPG及び Δ DPGを較正・記録し、 Δ DPGのP波高をmV/V/secで算出して解析を行った。

D. 心拍数の測定

実験中の心拍数は日本光電工業株式会社製のテレメータによってモニターした。電極は、胸骨柄上、左右の第5肋間の3点に装着した。

E. 位置負荷法

指尖部の細動脈血管に内圧変動を負荷する目的で実施する位置負荷法¹³⁾は、安静座位にある被験者の上肢を心臓位置 (heart level : HL, ± 0 cm) で水平に保たれたアームレスト上に置き、このアームレストの肘関節側を軸に指尖部側を上下方向に移動させるものである。本実験においては、+20cmと+40cmの挙上 (UP) 並びに-20cmと

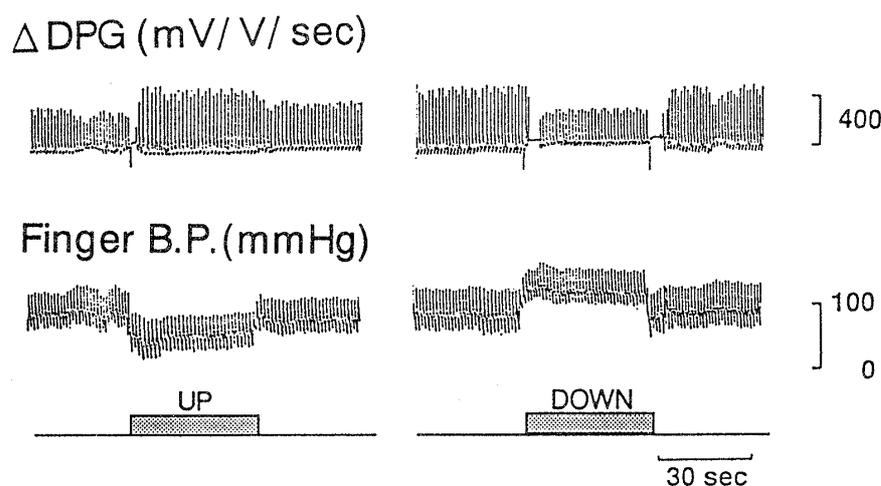


Fig. 1 Finger blood pressure and differential digital photoplethysmogram (Δ DPG) during arm position change. Rapid changes were observed in both arm raising (up) and arm lowering (down).

-40cmの垂下(DOWN)をそれぞれ実施した。これに併せて指尖血圧並びに Δ DPGの測定を行った。この位置負荷-指尖血圧応答及び Δ DPG応答の測定は、被験者を精神的に安定させ、かつ室内温度に馴れさせるために、被験者が椅子に座って10分以上経ってから数回の反復測定を行うものであった。

F. 実験条件

実験室内実験室の室温は実験中一定に保たれた。この実験室内実験室は防音性を持ち照度調節が可能であり、脈波などへの精神性要因の混入を防ぐように配慮した。

G. 統計処理

指尖血圧は、指尖部をそれぞれの位置に置き、血圧値波高が一定した時点での値を採用した。 Δ DPG-P波高についても同様で波高が一定した時点での値を採用し、挙上及び垂下時の心臓位置に対する相対値を求めた。また、測定によって得られた動脈脈圧と Δ DPG-P波高の値から血管コンプライアンスに相当する指標(mV/V/sec/mmHg)を次の式により算出し分析に加えた。

$$\text{Compliance Index} = \Delta \text{DPG-P 波高} / \text{PP}$$

実験結果の統計値は平均値と標準偏差(mean \pm S.D.)で表示した。有意差の検定にはstudentのunpaired t-testを用い、危険率5%未満を有意水準とした。

III. 結果

A. 指尖位置の変化に伴う指尖血圧の変動

心臓位からの上肢挙上および同垂下は、指尖部の動脈血圧を顕著に変化させる。Fig. 1は同一上肢(右手)の指尖血圧(第2指)と指尖容積微分脈波(第3指)を同時に導出した記録例である。指尖血圧は上肢指尖部の40cm挙上で瞬時に低下し、挙上中の30秒間では低下のレベルが維持される。反対に、上肢指尖部の40cm垂下で指尖血圧は瞬時に上昇し、垂下中の30秒間は上昇レベルが一定に維持される。上肢指尖部の心臓位置への復帰では、指尖血圧は瞬時にcontrolレベルに移行する。指尖容積微分脈波は、挙上・垂下のいずれの位置負荷においても指尖血圧と相反する結果を得た。

Table 1はこのような位置負荷-指尖部動脈血圧応答を被験者5名について計測した成績である。表は上段から、上肢指尖の心臓位からの距離

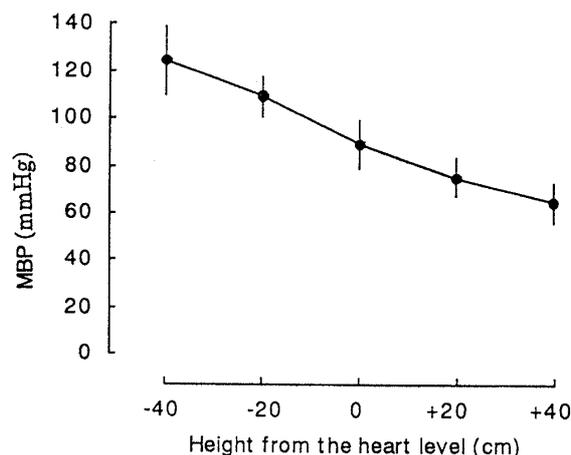


Fig. 2 Changes in mean finger blood pressure against the change in finger height (cm) relative to the heart level.

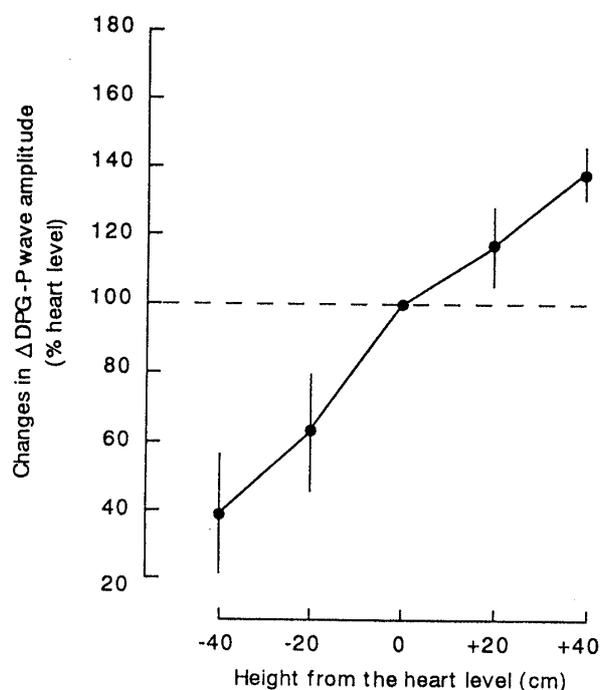


Fig. 3 Percent changes in (Δ DPG-P) wave amplitudes against the change in finger height (cm) relative to the heart level.

(cm), その距離 (cm) に0.77の定数を乗じた圧力値, 心臓位からの予測血圧変動値および実測平均血圧値を示す。例えば, 心臓位からの+20cm挙上は指尖部血管内圧が15.4mmHg低下する計算になり, 心臓位の平均血圧89.4mmHgをcontrolから差し引くと74.0mmHgが予想される。実際に指尖血圧を測定した値は 75.4 ± 7.9 (n = 5)

Table 1. Changes in mean finger blood pressure during gravitational potential energy change.

Vertical distance from the heart level (cm)	-40	-20	±0	+20	+40
Theoretical pressure (mmHg)	30.8	15.4	0	-15.4	-30.8
Calculated pressure (mmHg)	120.2	104.8	89.4	74.0	58.6
Measured pressure (mmHg)	124.6±14.4	108.9±11.4	89.4	75.4±7.9	64.5±8.4

Theoretical pressures were obtained as the product of vertical distance from the heart (cm) and conversion number 0.77 (mmHg/cm) in normal blood. Values are mean ±SD (n=5).

mmHgであり、近似した値を得ることになった。

Fig. 2 は、平均指尖血圧の位置負荷による変化をグラフで示したものである。上肢指尖部の垂下による内圧増大から挙上による内圧減少まで、ほぼ直線的な変化を示すことが判明した。脈圧 (PP) は心臓位置の 38.9 ± 3.7 mmHg から +20cm, +40cm の挙上でそれぞれ 35.0 ± 3.6 , 30.1 ± 4.8 に減少し、-20cm, -40cm の垂下でそれぞれ 43.1 ± 12.7 , 46.0 ± 9.5 へ増加した。

B. Δ DPG-P 波高及びコンプライアンス指標の変化

Fig. 3 は指尖容積微分脈波 (Δ DPG-P) の心臓位 (100%) からの変化率を示したものである。上肢指尖部の Δ DPG-P 波高は +20cm の挙上で $115.6 \pm 11.2\%$ に、+40cm で $138.3 \pm 7.5\%$ にそれぞれ増大し、-20cm の垂下で $62.1 \pm 16.8\%$ に、-40cm の垂下で $38.7 \pm 17.1\%$ にそれぞれ減少した。

Fig. 4 はコンプライアンス指標を平均血圧

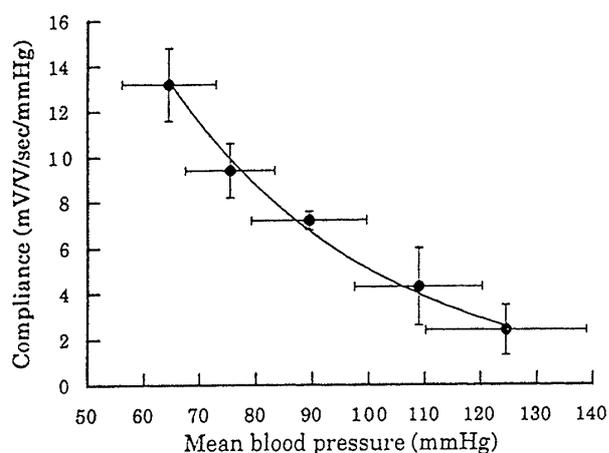


Fig. 4 Changes in finger arteriolar compliance index compared to the mean blood pressure.

(MBP) との関係でプロットしたグラフである。そのコンプライアンス指標は、心臓位置の 7.2 ± 0.4 (n=4) mV/V/sec/mmHg より、+20cm の挙上で 9.4 ± 1.2 (4) に、+40cm の挙上で 13.2 ± 1.6 (4) に、それぞれ有意な増大を示した。垂下では、-20cm で 4.3 ± 1.7 (4) へ、-40cm の垂下で 2.4 ± 1.1 (4) へ減少した。この結果は、 Δ DPG-P 波高の変化とほぼ同じ傾向の変化を示した。

IV. 考 察

A. 指尖血圧の安定計測について

運動、動作及び睡眠中の血圧測定は運動生理学の領域でも長く求めてきたところである。最近、この動的状態下の測定の一つに、Penaz¹⁰⁾の原理的な提案を基礎に技術的改善を計り出来上がった指尖部血圧センサー装着型の非観血的連続血圧計測がある²⁾。今回の実験結果によると、仰臥位または座位で測定肢の位置変化がなければ、血圧の正確な連続測定は容易であること、血圧センサーも小さくて装着も簡易であること、ポリグラフ上に他の生理パラメータと並行した計測が可能であることなどがわかった。また、本装置は慢性高血圧疾患の連続観察にも有用であると思われる。ただ、これには前述の条件が必要であり、本研究のようにその条件からはみ出す実験を行う場合には、予想通り変化は明瞭に現れるところとなる。そこでまずは実験事実を確認するとともに、変化の生理的意味を検討し、その活用を考えてみたい。

この実験では、実験の前後すなわち対照測定時の心臓・循環系が安定であることを最も重視している。また、今回の実験過程はすべて座位姿勢で統一しているが、すでに関連の研究より立位・仰臥位・座位の姿勢ではともに同じ傾向を示すためである^{11,12,13)}。今回の測定上肢の指尖部は心臓の圧基準位にあわせ、その位置での指尖血圧が安

定であるよう全被験者に徹底した。また、対照時の心拍数も経時的に大きな変動がないことを前提条件としている。実験の結果、測定上肢の重力的位置が心臓基準位置から変位すると、指尖血圧は明瞭に変化することが判明した (Fig. 1, 2)。すなわち、収縮期血圧は挙上で全員が減少し、垂下で全員が増大した。拡張期血圧も挙上で全員が減少し、垂下では5名中3名が顕著に増大した。脈圧に関しては被験者間で多少の差異がみられた。今回の実験は、測定上肢を意図的に数10cmも挙上・垂下するもので、通常の高血圧測定常識からは起こり得ないことである。しかしながら、運動の際の知見としては十分この結果が役に立つと考える。運動時の測定上肢は測定時間中の上下移動さえなければ、随意的な固定位置と心臓位置からの距離 (cm) に換算係数0.77を乗じて測定血圧値の加減修正を行うことができるからである。

一般に、指尖血圧測定は細動脈の安定的な応答を基礎にしている。細動脈平滑筋は、精神・神経性の影響を敏感に受け血管口径を変化させる^{3,12)}。情緒不安定な被験者では、対照実験の段階で動揺が明瞭に観察される。カテコラミンを含む内分泌性の影響もすでに知られているところである⁴⁾。これらのことから、指尖血圧の測定では心拍数の安定と共に動揺のない心臓位を個人の標準値とすべきである。

B. 位置負荷法の妥当性について

本研究のもう一つの目標は、変化の程度を積極的に活用し、指尖にかかる重力の影響を血圧応答として定量的に観察しようというものである。位置負荷法はすでに負荷脈波の一種として開発したものであり、これは上肢 (または下肢) が血圧起点の心臓位から上下に数10cm移動する毎に重力負荷を受け、それが細動脈平滑筋のBayliss効果^{1,6,7,9)}を誘起するという仮説にしたがっている^{8,13)}。本研究で採用した指尖血圧測定装置は指尖部細動脈の生理的な情報を機械的な圧力に変換し、経時的な追従が出来る特色を有している²⁾。細動脈情報とは口径変化とそれに伴う血流の変化すなわちヘモグロビン容量の変動のことである。この点では、この測定センサーは基礎的な部分で透過型の光電容積脈波と通ずるところがある。これまでの位置負荷法に従い、心臓位からの上肢の上下移動距離 (cm) を指尖血圧の定量的な反応

で置き換えてみると両者にはほぼ比例した結果が得られた。物理的な移動量 (cm) と生理的な反応量は定量的な変化として計測されたのである。このことは、変化に対する本測定装置の精巧な追従性や安定性が評価されたことになり、さらには位置負荷法の妥当性を支持する結果にもなったものとする。

C. 位置負荷法と末梢循環応答

本研究は、位置負荷に対する末梢循環系の応答を指尖血圧測定による血圧情報の立場から検討することも課題としている。心拍動に対応する指尖容積の変化 (Fig. 3) は、指尖部細動脈の compliance と脈圧との積として表現される⁵⁾。位置負荷法では Δ DPG-P 波高を指尖容積変動の指標として用い、指尖部細動脈の血管緊張の変化を観察することになっている^{13,14)}。従って、位置負荷法においては圧基準位置からの上肢の上下移動により収縮期・拡張期血圧が平行して変化し、脈圧は変化しないということが前提条件になっている。本研究では指尖型の非観血連続血圧測定装置を用いて位置負荷時の指尖動脈血圧の変動を詳細に検討した。その結果、指尖動脈の収縮期・拡張期血圧は上肢の心臓位置から上下方向への移動距離に比例して変化し、脈圧には Δ DPG-P 波高に見られるような一定の顕著な変化は認められなかった。さらに、 Δ DPG-P 波高 (容積変化, ΔV) を脈圧 (圧変化, ΔP で除した指尖細動脈の compliance ($\Delta V/\Delta P$) の変化もこれまでの位置負荷に伴う Δ DPG-P 波高変化の結果と一致したものであった (Fig. 4)。ただ、この図で示す変化が直線的か非直線的かについては今後の検討課題であると思われる。とにかく、この指尖血圧測定からも、位置負荷に伴う Δ DPG-P 波高の変動は指尖脈管系の経壁圧変化にともなう血管平滑筋の筋原性応答を示していることが再確認されたものとする。

以上より、指尖型の非観血連続血圧測定装置では測定中に指尖部の位置変動がないことを重要な条件とすべきであり、さらにはこの装置の精巧な追従性や安定性から、指尖部の細動脈平滑筋の筋原性応答を誘発する位置負荷法の妥当性を確認することができたと思われる。

文献

- 1) BAYLISS WM (1902) : On the local reactions of the arterial wall to changes of internal pressure. *J Physiol* 28 : 220-231.
- 2) BOEHMER RD (1987) : Continuous, real-time, noninvasive monitor of blood pressure: Penaz methodology applied to the finger. *J Clin Monit* 3 : 282-287.
- 3) FOLKOW B and NEIL E (1971) : *Circulation*. Oxford University Press. “循環” 入内島十郎訳, 真興交易医書出版部, 東京(1973).
- 4) GANONG WF (1993) : Review of medical physiology, 16th Ed., Chap. 31, 541-542, Appleton & Lange, Connecticut.
- 5) GOERKE J and MINES AH (1988) : *Cardiovascular Physiology*. 80-84, Raven Press, New York.
- 6) JOHNSON PC (1980) : The myogenic response. In Bohr DF, Somolyo AP and Sparks HV, *Handbook of Physiology, Sect. 2, The Cardiovascular System, Vol. II, Vascular Smooth Muscle*, 409-442, American Physiological Society, Bethesda, Maryland.
- 7) JOHNSON PC (1981) : Myogenic mechanisms of blood flow regulation. In Vanhoutte PM and Leuse I, *Vasodilatation*, 255-262, Raven Press, New York.
- 8) 前田順一, 竹宮 隆(1989) : レーザー組織血流計及び双方向性超音波血流計による位置負荷—末梢循環応答の分析. *体力科学* 39 : 106-113.
- 9) MELLANDER S (1988) : Myogenic mechanisms in local vascular control. *Acta Physiol Scand* 133 (Suppl 571) : 25-42.
- 10) PENAZ J (1973) : Photoelectric measurement of blood pressure, volume and flow in the finger. In: *Digest of the 10th International Conference on Medical and Biological Engineering*. Dresden, 104.
- 11) 竹宮 隆, 蔡 桜蘭, 前田順一 (1984) : Head-down型体位変換における指尖容積脈波の微分波経時計測. *筑波大学体育科学系紀要* 7 : 222-215.
- 12) 竹宮 隆, 衣笠 隆, 宮下 節, 前田順一, 小宮秀明 (1985) : 運動時の指尖容積微分脈波について. *日本生理学雑誌* 47(2) : 65-76.
- 13) 竹宮 隆, 前田順一, 安藤真太郎, 宮崎純一 (1989) : 位置負荷による指尖容積微分脈波の応答性について. *体力科学* 38 : 64-70.
- 14) 竹宮 隆 (1990) : 指尖容積微分脈波からみた末梢循環情報. *体育の科学* 40 : 625-631.