

[原 著]

女子長距離走選手の頸動脈圧受容器－心臓圧反射応答

佐川 壽榮子¹⁾, 森川 壽人¹⁾

Carotid baroreceptor-cardiac responsiveness in female long distance runners

Sueko SAGAWA¹⁾ and Hisatoshi MORIKAWA¹⁾

Abstract

There are evidences suggesting that endurance-trained athletes (ET) fail to maintain blood pressure responses to gravitational challenges such as head-up tilt, standing, or lower body negative pressure. The purpose of the present study was to examine whether gravitational intolerance in ET was due to a blunted carotid baroreceptor-cardiac responsiveness. Eight ET females (long distance runners, 18.4±0.2 y.o.) and seven endurance-untrained females (UT 20.4±0.9 y.o.) participated in the experiment. Carotid baroreceptor-cardiac responses were estimated by using a neck chamber. R-R intervals were plotted against carotid distending pressures and the response was analyzed by applying a four-parameter sigmoidal logistic function. The maximal gain of the curve in ET group was greater ($P<0.05$) than that of UT group, indicating increased baroreflex sensitivity. The centering point of the curve, an indicator of the operating point, was identical. There was a significant correlation between maximal O_2 consumption and maximal gain ($r=0.693$, $P<0.005$). These results may suggest that attenuated baroreflex control of the heart rate in ET is not responsible for the mechanisms of the gravitational intolerance.

KEY WORDS : endurance-trained athletes, carotid baroreceptors, neck chamber, baroreflex sensitivity

1. はじめに

ヒトが座位あるいは臥位から急に立ち上がると重力の影響で血液が下半身に移動するため、血圧が一時的に低下する。心肺圧受容器および動脈圧受容器は血管壁の伸展度の低下を感知し、求心性インパルスの発射頻度が低下する。この情報は延髄の心臓血管運動中枢に伝わり、ここから末梢血管抵抗の増大および心拍数と心収縮力を増大する方向へ遠心性情報を発し、血圧は元に戻される。これら一連の反応は血圧反射といわ

れるもので、姿勢変換時の血圧低下を防御する機構であり、正常では過度に血圧が低下して失神を起こすことはない。ところが持久性運動鍛錬者は臥位から立位への姿勢変換や下半身陰圧負荷 (lower body negative pressure, LBNP) に対する中心血液量低下に対する耐性が低く、血圧調節機能の減弱が報告されている¹⁾⁻⁴⁾。

この原因について、先行研究では心拍の圧反射感受性の低下^{2) 5) 6) 7)} や圧反射による血管抵抗増大反応の鈍磨^{2) 8)} の可能性が指摘されている。これらの研究は男

1) 九州共立大学スポーツ学部

1) Kyusyu Kyoritsu University Faculty of Sports Science

性運動鍛錬者についての知見が多く、女性運動鍛錬者のLBNP耐性は非鍛錬者と差がないという報告もある⁹⁾¹⁰⁾。著者等¹¹⁾は先行研究で女性長距離走者のLBNP耐性は非運動鍛錬者に比べ明らかに低下していることを報告した。この原因として、非鍛錬者に比べて彼女たちの有意な下肢コンプライアンスの増大がLBNP中の下半身への血液貯留量を増大し、静脈環流量を減少させてLBNP負荷時の失神前兆候の出現率を増加させた可能性を指摘した。しかし、心拍の圧反射感受性については検討されていなかった。そこで本研究は持久性運動鍛錬者のLBNP耐性低下に、心拍の圧反射感受性の低下が関与しているか否かを検討する目的で、女子長距離走選手を被験者にして頸動脈圧受容器-心臓圧反射応答を調べた。

2. 方法

被験者

持久性運動鍛錬者の被験者として、5～6年間、長距離走トレーニングを行っている8名の体育女子学生と、対照として特に定期的な運動をしていない7名の女子医学生が実験に参加した。長距離走の被験者は1週間に90～120km 走行している。それぞれの被験者に実験内容について十分な説明を行い、同意書を得た。なお本研究は産業医科大学研究倫理委員会の承認を得て実施した。

実験1. 身体組成と最大酸素摂取量の測定

それぞれの被験者について、頸動脈圧反射テストの少なくとも3日前に自転車エルゴメーター (Ergomedic, model 818E, Monark, Sweden) を用いて負荷漸増法による最大酸素消費量を測定した。呼吸ガスはガス質量分析計 (Model RL-600, Westron, Chiba Japan) を用いて分析した。体組成分析計 (EM-Scan, model HA-2, Springfield, IL) によって総体脂肪率を求めた。すべての実験は室温22℃、相対湿度60%に制御された人工気候室で行った。

実験2. 頸動脈圧受容器反射の測定

頸動脈圧受容器反射の測定は、Eckberg 等¹²⁾ と Sprenkle等¹³⁾ の方法に従い、先行研究¹⁴⁾ と同様な手技で測定した。被験者を仰臥安静にさせて、頸動脈を外部から圧迫または吸引できるネックチャンバーを頸部に装着した。心拍の呼吸変動を避けるために機能的残気量のレベルで呼吸を止め、ネックチャンバーの

圧力を+30 mmHgから-50 mmHgまで1心拍ごとに10 mmHgずつ変化させ、このときのR-R間隔をコンピュータに取り込んだ。ネックチャンバーの圧力は心電図のR波でトリガーがかかるようにコンピュータ制御されている。1～2分間呼吸が安定するのを待って8～10回測定を繰り返し、平均値を解析に用いた。

解析

ベースラインの血圧を自動血圧計 (UA-751; Takeda Medical, Tokyo, Japan) で測定し、このときの平均動脈圧からネックチャンバーの圧力を減じて頸動脈洞にかかる圧力をcarotid distending pressure (CDP) とした。平均動脈圧は拡張期血圧+1/3脈圧で求めた。この圧力に対してR-R間隔をプロットするとS字状曲線を示すので、R-R間隔の圧応答曲線はKent等¹⁵⁾ によって報告されている以下の式でフィットさせることができる。

$$R-R \text{ 間隔} = A_1 \times \{1 + e[A_2(CDP - A_3)]\}^{-1} + A_4$$

ここで、 A_1 はR-R間隔の最大反応幅、 A_2 はS字状曲線のスロープを決定する係数、 A_3 はこのカーブの中心点におけるCDP、 A_4 は最小R-R間隔である。さらにこの曲線の最大ゲインは次式で与えられる。

$$\text{最大ゲイン} = A_1 \times A_2 / 4$$

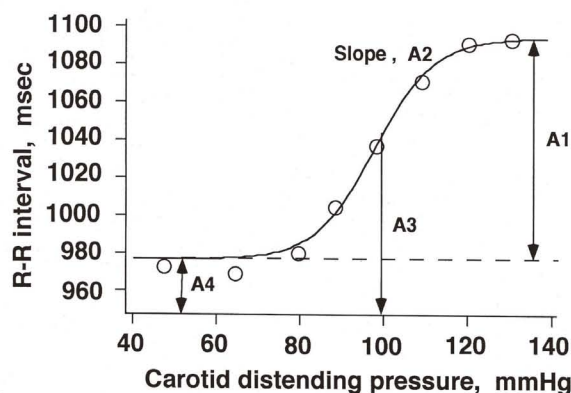


Fig 1. Typical sigmoidal regression curve fit to data obtained from 1 subject.

以上のようなパラメーターを求め、両群の圧応答曲線を解析した。図1は上記の式を用いてカーブフィッティングさせた圧反射応答曲線の1例である。

統計解析

対応のないStudent's *t* テストを用いて運動鍛錬者と非鍛錬者の測定結果を比較し、 $P < 0.05$ を有意と判定した。データは平均値 \pm S.E.で示した。

3. 結果

Table 1. Characteristics of the subject

	N	Age (y.o.)	Height (cm)	Body weight (kg)	Body fat (%)	$\dot{V}O_2$ max (ml/min/kg)	Resting HR (beats/min)
Untrained	7	20.4 \pm 0.9	157.4 \pm 1.8	55.1 \pm 1.6	25.8 \pm 1.1	31.8 \pm 1.2	67.0 \pm 3.5
Trained	8	18.4 \pm 0.2	160.9 \pm 1.4	50.8 \pm 1.2	19.4 \pm 1.0*	43.9 \pm 1.5*	56.4 \pm 1.6*

Values are means \pm SE. *, $P < 0.05$ vs. untrained subjects.

表1に被験者の身体特徴を示した。身長や体重は両群で差が認められなかったが、長距離選手の体脂肪率は非鍛錬者に比べて有意に低値であった ($P < 0.05$)。長距離選手は最大酸素摂取量が非鍛錬者より高く ($P < 0.05$)、安静時の心拍数は有意に低値 ($P < 0.05$) で、持久性運動のトレーニング効果が認められた。

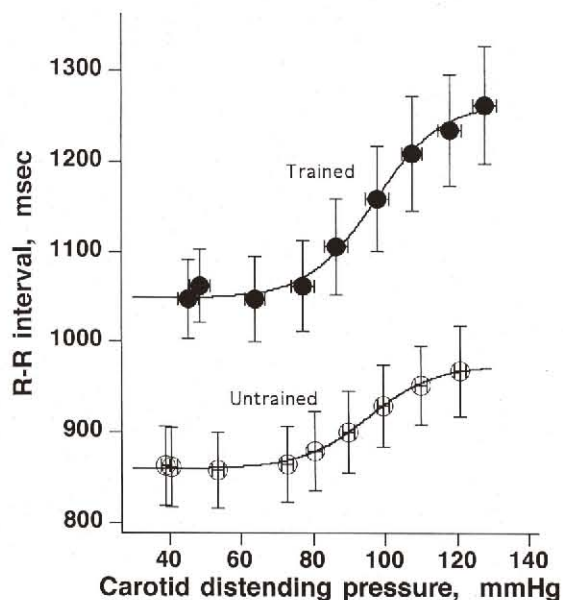


Fig. 2. Baroreflex response curve. ○, untrained subjects; ●, endurance-trained subjects.

頸動脈洞—心臓圧反射応答を先に述べたKentの式を用いてカーブフィッティングした (図2)。図から明らかなように長距離選手の圧応答曲線は非鍛錬者より上方にシフトし、また曲線のスロープが急峻で単なる上方への平行移動ではないことが判る。このような応答曲線はそれぞれのパラメーターを分析することでその特徴が明らかになる。表2に示したように、長距

Table 2. Logistic model parameters describing carotid sinus cardiac baroreflex response

	A ₁ (msec)	A ₂	A ₃ (mmHg)	A ₄ (msec)	Max. gain (msec/mmHg)
Untrained	124.6 \pm 22.9	0.122 \pm 0.023	96.7 \pm 4.9	859.1 \pm 42.2	3.71 \pm 0.73
Trained	226.7 \pm 44.9*	0.145 \pm 0.021	98.8 \pm 5.5	1044.7 \pm 45.3*	7.54 \pm 1.50*

Values are means \pm SE. *, $P < 0.05$ vs. untrained subjects.

離選手は非鍛錬者に比べてA₁、つまり最大反応幅が有意に大 ($P < 0.05$) であった。これは心拍数の増減によって血圧の変動を抑えようとするbuffer capacityが大きいことを意味している。運動鍛錬者は圧応答曲線の最大ゲインは非鍛錬者より有意に大で ($P < 0.05$)、血圧変動に対する心拍変動の感受性が高いことを示している。長距離選手における最小R-R間隔 (A₄) の有意な増大は安静時の心拍数が非鍛錬者より低いことを反映している。一方A₃、即ち曲線の中心点は両群で差がなく、圧応答曲線の水平方向へのシフトがないことから長距離選手の頸動脈—心臓圧反射応答のリセッティングは起きていないことを示唆している。

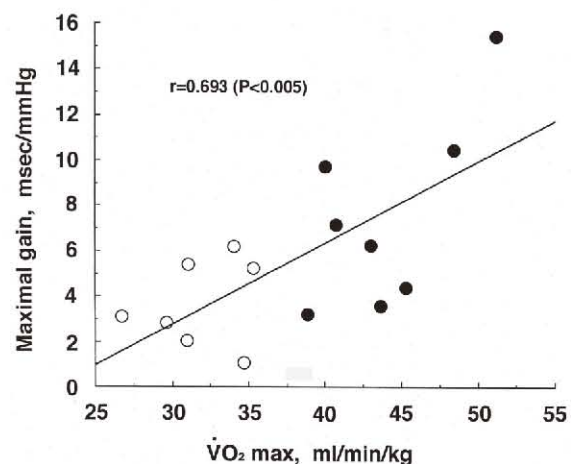


Fig. 3. Relationship between maximal oxygen consumption and maximal baroreflex gain. ○, untrained subjects; ●, endurance-trained subjects.

全ての被験者について最大酸素摂取量に対して最大ゲインをプロットすると (図3) 両者の間には有意な正相関が認められた ($r = 0.693$, $P < 0.005$)。即ち、持久性運動能力が優れている程、頸動脈—心臓圧反射応答の感受性が高いことが判明した。

4. 考察

本研究は女性持久性運動鍛錬者の頸動脈圧受容器

一心臓圧反射応答の感受性は非鍛錬者に比べて有意 ($P<0.05$) に増大していることを明らかにした。本研究結果は若い男性の頸動脈圧受容器一心臓圧反射応答を調べたBarney等¹⁶⁾の報告と一致した。これらの結果から、性差にかかわらず、持久性運動鍛錬者の頸動脈一心臓圧反射感受性は増強すると考えられる。一方、Halliwill等¹⁷⁾は特に運動鍛錬を行っていない若い男女に、最大酸素摂取量の60%の強度の自転車エルゴメーター運動をおこなった後にネックチャンパー法で頸動脈一心臓圧受容器テストを行い、運動後に圧反射感受性が有意に増大したと報告しており、運動それ自体が頸動脈圧受容器の心臓圧反射感受性を増強させる可能性がある。

これに対し、Shi 等⁵⁾はフェニレフリン注入によって血圧を上昇させながら頸部をネックチャンパーで加圧し、頸動脈圧受容器が作動しないようにして大動脈圧受容器の心拍圧反射感受性を検討した結果、運動鍛錬者で有意に低下したと報告した。本実験で用いたネックチャンパー法は非侵襲的に頸動脈圧受容器反射を評価する方法であり、大動脈圧受容器については測定されていないので、両研究を比較するのは困難である。

表1で示したように持久性運動鍛錬により除脈が起きる。この除脈は運動鍛錬による心臓収縮力の増大と心臓副交感神経の亢進によって起きると考えられており^{18) - 20)}、長距離選手の圧反射感受性が非鍛錬者より高い理由の1つとしてベースラインの心臓副交感神経亢進の可能性が考えられる。ネックチャンパー法による頸動脈圧受容器反射は心拍数を制御する自律神経のうち、主に副交感神経成分の働きをみているので²¹⁾、運動鍛錬者は亢進した副交感神経活動によって非鍛錬者よりもダイナミックに反応した可能性が考えられる。

今回の結果は、運動鍛錬者では心拍出量を維持するために心拍数を増加させる頸動脈の圧反射感受性は決して減弱しているのではなく、むしろ血圧低下に対し、ダイナミックに高い感受性をもって反応することが判明した。仮にShi等⁵⁾の報告の通り、大動脈の圧受容器の感受性が運動鍛錬によって減弱していたとしても、頸動脈の圧受容器の亢進によって相殺され、心拍の圧反射感受性の変動自体が持久性運動鍛錬者の姿勢返変換時耐性に大きく関与しているようには見えない。我々は先行研究において女性持久性運動鍛錬者と非鍛錬者に0から-60 mmHgまでそれぞれ3分間ずつ連続してLBNP負荷を与え、この間の失神前徴候発現率が運動鍛錬者で有意に高値(65.4% vs. 34.8%,

$P<0.05$)であることを観察し、このLBNP耐性低下の一因として彼女たちの下肢コンプライアンスの増大を指摘した¹¹⁾。一方、LBNP中の末梢血管抵抗増加反応や血管収縮に関与するホルモンおよび液性物質(バゾプレッシン、ノルアドレナリン、レニン)の分泌量には運動鍛錬者と非鍛錬者で差を認めなかった。これらの実験結果と本研究結果を総合すると、女子持久性運動鍛錬者のLBNP耐性低下は、運動鍛錬によって下肢静脈の伸展性が増加し、下半身への血液貯留量が増大する結果、静脈環流量が顕著に低下することが大きな原因で、血圧反射の感受性低下によるものとは考えにくい。運動鍛錬者の心臓圧反射感受性は増加しているものの、心拍数の増加だけで心拍出量を増やすには限界があり、1回心拍出量を適切に維持できなければ失神を防ぐのは困難であると考えられる。

以上から、女子持久性運動鍛錬者の頸動脈圧受容器一心臓圧反射応答の感受性は非鍛錬者に比べて有意 ($P<0.05$) に大であり、最大酸素摂取量と圧反射感受性との間に有意な ($P<0.005$) 正の相関が認められた。しかし、血圧反射のリセッティングは起きていないことが判明した。

引用文献

- 1) Klein K. E., H. M. Wegmann, and P. Kuklinski (1977): Athletic endurance training—advantage for space flight?: the significance of physical fitness for selection and training of spacelab clews. *Avia Space Environ Med* 48: 215-222.
- 2) Raven P. W., D. L. Rohm-Young, and C. G. Blomqvist (1984): Physical fitness and cardiovascular responses to lower body negative pressure. *J Appl Physiol* 56: 138-144.
- 3) Smith, M. L., and P. V. Raven (1986): Cardiovascular responses to lower body negative pressure in endurance and static exercise-trained men. *Med. Sci Sports Exerc.* 18: 545-550.
- 4) Stegemann, J., U. Meier, W. Skipka, W. Hartlieb, B. Hemmer, and U. Tibes (1975): Effects of a multi-hour immersion with intermittent exercise on urinary excretion and tilt table to tolerance in athletes and non athletes. *Avia Space Environ Med.* 46: 26-29.
- 5) Shi, X., J. M. Andersen, J. T. Potts, B. H. Foresman, S. A. Stern and P. B. Raven (1993):

- Aortic baroreflex control of heart rate during hypertensive stimuli : effect of fitness. *J Appl Physiol* 74: 1555-1562.
- 6) Smith, M. L., H. M. Graizer, D. L. Hudson, and P. B. Raven (1988): Baroreflex function in endurance- and static exercise-trained men. *J Appl Physiol* 64: 585-591.
 - 7) Stegemann J., A. Busert, and D. Brock (1975): Influence of fitness on the blood pressure control system in man. *Aerspace Med* 45: 45-48.
 - 8) Mack, G. W., S. Shi, H. Nose, A. Tripathi, and E. R. Nadel (1987): Diminished baroreflex control of forearm vascular resistance in physically fit humans. *J Appl Physiol* 63: 105-110.
 - 9) Frey, M. A. B., K. L. Mathes, and G. W. Hoffler (1988): Aerobic fitness in women and responses to lower body negative pressure. *Avia Space Environ Med* 58: 1149-1152.
 - 10) Hudson, D. L., M. L. Smith, and P. B. Raven (1987): Physical fitness and hemodynamic responses of women to lower body negative pressure. *Med Sci Sports Exerc* 19: 375-381.
 - 11) Morikawa, T., S. Sagawa, R. Torii, Y. Endo, F. Yamazaki, and K. Shiraki (2001): Hypovolemic intolerance to lower body negative pressure in female runners. *Med Sci Sports Exerc* 33: 2058-2064.
 - 12) Eckberg, D. L., V. A. Convertino, J. M. Fritsch, and F. Doerr (1992): Reproducibility of human vagal carotid baroreceptor-cardiac reflex responses. *Am J Physiol* 263 (Regulatory Integrative Comp Physiol 32): R215-R220.
 - 13) Sprenkle, J. M., D. L. Eckberg, R. L. Goble, J. J. Schelhorn, and H. C. Halliday (1986): Device for rapid quantification of human carotid baroreceptor-cardiac reflex responses. *J Appl Physiol* 60: 727-732.
 - 14) Sagawa S., R. Torii, K. Nagaya, F. Wada, Y. Endo, and K. Shiraki (1997): Carotid baroreflex control of heart rate during acute exposure to simulated altitudes of 3,800 m and 4,300 m. *Am J Physiol* 273 (Regulatory Integrative Comp Physiol 42): R1219-R1223.
 - 15) Kent, B. B., J. W. Drane, B. Blumenstein, and J. W. Man Manning (1972): A mathematical model to assess changes in the baroreceptor reflex. *Cardiology* 57: 295-310.
 - 16) Barney J. A., T. J. Ebert, L. Groban, P. A. Farrell, C. V. Hughes, and J. J. Smith (1988): Carotid baroreflex responsiveness in high-fit and sedentary young men. *J Appl Physiol* 65: 2190-2194.
 - 17) Halliwill, J. R., J. A. Taylor, T. D. Hartwig, and D. L. Eckberg (1996): Augmented baroreflex heart rate gain after moderate-intensity, dynamic exercise. *Am J Physiol* 270 (Regulatory Integrative Comp Physiol 39): R420-R426.
 - 18) Clausen, J. P. (1977): Effect of physical training on cardiovascular adjustments to exercise in man. *Physiol Rev* 57: 779-815.
 - 19) Ekblom, B., A. Kilbom, and J. Soltysiak (1973): Physical training, bradycardia, and autonomic nervous system. *Scan J Clin Lab Invest* 32: 251-256.
 - 20) Scheuer, J., and C. M. Tipton (1977): Cardiovascular adaptation to physical training. *Annu Rev Physiol* 39: 221-251.
 - 21) Eckberg, D. L. (1993): How should human baroreflexes be tested?. *News Physiol Sci* 8: 7-12.