

[原 著]

指尖容積微分脈波を用いた女子水泳競技者の末梢血流反応

江口和美*・田中幸夫***・小早川ゆり**1・清田 寛**2
竹宮 隆****・堀居 昭**3

(2005年5月9日受付, 2005年7月19日受理)

Characteristics of Microcirculatory Response in Female Athletics Swimmers Measured by Delta DPG

Kazumi EGUCHI, Yukio TANAKA, Yuri KOBAYAKAWA, Hiroshi KIYOTA, Takashi TAKEMIYA and Akira HORII

Differential digital photoplethysmogram (Δ DPG) were developed as method to understanding the movement of peripheral circulation. Δ DPG is simple differential on digital photoplethysmogram (DPG). Measurement of Δ DPG suited aperture changes in the humans blood vessel reaction. Specially, It is interested adaptability blood vessel reaction in high training athletes. The purpose of this study was to perform Δ DPG measurements and observe changes in microvascular responses to positional loading. Analysis by positional loading was initially performed. Followed by that by image loading. The subjects were 6 female swimmers with a mean swimming history 11 years and 6 adult female non-swimmers. Blood pressure of rest obtained standard value in all subjects. Heart rate was shown tendency of bradycardis. In the sitting position at rest, DPG, Δ DPG, respiratory curve recording, electrocardiography, and measurement using a Finapres were simultaneously performed. In positional loading, Δ DPG showed dilation while the arms were being raised above the heart and contraction waves while the arms were being lowered and significantly slighter changes in dilation contraction responses in the swimmers than in the non-swimmers ($p < 0.05$). These changes in the involvement of the sympathetic nerve on the vascular smooth muscle. In imaging loading, Δ DPG showed vascular dilation in the swimmers during imaging of pressure in competition in the swimmers compared with the non-swimmers. As a result, imaging loading suggested to involved in pars centralys-sympathetic nerve.

Key words: Δ DPG, Microcirculatory, Positional and image loading, Female Athletics swimmers

キーワード: Δ DPG, 末梢循環, 位置負荷およびイメージ負荷, 女子水泳競技者

I. 緒 言

水泳運動は、若年者から高齢者まで幅広く行われている。水には物理的な特性が働き、水中での運動に一種の抵抗として働く。また水泳運動では、水面

上の身体各部位が重力に対して均等であり立位姿勢運動とは異なった横臥位姿勢の特色が考えられる。したがって、水泳運動における末梢循環系の機能やその対応による変化の研究には関心がある。

* 日本体育大学大学院博士後期課程トレーニング科学系, **1 日本体育大学運動方法水泳研究室, **2 日本体育大学発育発達研究室, **3 日本体育大学運動処方研究室, *** 東京農工大学, **** 八戸大学運動生理学/末梢循環系

末梢循環系の細動脈は、全身の血圧維持に果たす役割が大きいだけでなく、末梢組織の最適血流の確保にも役立っている。さらに心臓を中心とする全身循環系とともに、末梢循環系は運動の持続すなわち持久力のメカニズム構成に重要な役割を果たしている^{3,5,18)}。すなわち細動脈の変化は、持久性運動に影響を及ぼすと思われるが、このような研究は少ない¹⁴⁾。

指尖容積微分脈波 (differential digital photoplethysmogram; Δ DPG) は、末梢循環系の血管動態を知る方法の一つとして開発された^{15,16)}。これは指尖容積脈波 (digital photoplethysmogram; DPG) の一次微分脈波からなり、心拍動で大動脈系に生じた容積変化を指尖部で記録できる。指尖部細動脈の反応は、人間の上肢または下肢の指尖部から容易に記録でき、末梢性血管の調節機構の一つである筋原性応答をも DPG および Δ DPG 測定より導出されることが考えられる。

本研究では、女子競泳スポーツの領域で競泳者を対象に Δ DPG 分析を試みる。本測定は、安静時状態における上肢指尖部の局所を心臓位レベルからの上肢挙上または上肢垂下の方法で変化させることにより、細動脈の内圧変化に伴う血管収縮応答および拡張応答を観察しようとするものである。本実験では、最初に位置負荷-末梢血管応答の変化を分析し、続いて精神・神経性のイメージ負荷-血管応答の関係を検討する。

II. 実験方法

A. 被験者

被験者は、平均年齢 19.8 ± 0.9 歳、競泳歴平均 11.5 ± 1.3 年の女性競泳者 (swimmers) 6 名であった。対照群は、平均年齢 22.5 ± 1.5 歳の一般成人女性 (non-swimmers) 6 名であった。また競泳者の安静時心拍数は、スポーツマン型の徐脈傾向下にあることおよび不整脈などの異常がないことを確認した。さらに、被験者の指尖部測定には、右手 (利き手) を中心に行った。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。実験期間は、3月から4月であった。

B. 生理的測定

1) 指尖容積微分脈波測定 (Δ DPG)

全被験者の測定は、安静座位で実施された。

Δ DPG 測定には、校正脈波計 MLV-2201 (日本光電 (株) 社製) のピックアップ出力をパワーラブの微分回路を通してパソコンに取り込んだ (Fig. 1)。この装置では、指尖部 pick up が光透過型であり、これを右手第2指尖部に装着した。血流の変動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。細動脈の血管収縮応答による血流の減少は吸光量減少および透過光量の増大となり、photo cell の抵抗値減少に伴う端子電圧 (mV) の低下に至るものと考えられる。また、微分波の中で本実験が分析の対象とした波形は P 波の波高である。

2) 非観血的連続自動血圧測定 (フィナプレス: Finapless)

指尖部動脈の血圧測定は、非観血的連続自動血圧計フィナプレス 2300 (オメダ社製) で行った (Fig. 1)。血圧測定用のフィンガーカフは右手第3指に装着した。フィナプレスでは、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することができる²⁾。この装置は、指尖部細動脈の生理的な情報を機械的な圧力に変換し、経時的に記録ができる特色をもっている。ただし、本実験は測定部位が心臓位レベルから上下に偏位すれば波高が変化する事実を実験手法として逆に採用したものであり、通常の安静時血圧検診などでは位置の変化による波形の変化が生じないように注意しなければならない。

3) 呼吸相測定

サーミスタ呼吸ピックアップ TR-611T は外気と体内との境界になる位置の鼻口部にサージカルテープで固定し、ポリグラフ (日本光電 (株) 製) の前置増幅器を経てパワーラブに入力し、パソコンで計測した (Fig. 1)。

4) 心電図による心拍数測定

心拍数は、心電図の胸部双極導出法に従い、代表的な右上胸部-左下胸部にそれぞれ電極を置き、電位変化をポリグラフの前置増幅器およびパワーラブからパソコンでデータ測定を行った (Fig. 1)。

C. 位置負荷- Δ DPG 応答

位置負荷法は、一種の重力負荷法であり、指尖部の血管内圧は心臓レベルからの上肢-指尖部の挙上で低下し、その垂下で増大する。すなわち、位置負荷法は、指尖部血管の内圧変化を随意に誘起する測定法である^{15,16)}。本実験では、安静座位の姿勢で指尖部を心臓位レベルに置いた状態から指尖位置を挙

上または垂下させた。心臓位レベルの測定は対照値として重要であり、実験開始前・挙上・垂下・終了時でそれぞれ測定し、一連の記録の安定性を確認した。今回は、簡易に心臓位レベルから真上に90度挙上および真下に90度垂下の条件で行った。

D. イメージ負荷- Δ DPG 応答

イメージ負荷法による Δ DPG測定は、記録上の基線が安定していることから本研究でも精神・神経性の作用を測定しようとするものである。指尖部は心臓位レベルの状態に置き、安静状態の記録に続き緊張イメージ(試合場面)およびリラックスイメージ(休息場面)を1分間想起するように指示した。実験終了後には、イメージの内容について調査を行った。

E. 統計処理

Δ DPGは、指尖部を心臓位レベル、挙上位および垂下位の波形が安定した時点での値を採用し、パワーラプソフトでデータを取り込み、エクセルでデータ処理を行った。今回のデータはすべて心臓位レベルをコントロールとした。実験結果の統計値

は、統計処理ソフト SPSS-11Jにより平均値と標準偏差、対応のないt検定およびノンパラメトリック検定法(危険率5%未満とした)を用いて行った。

III. 実験結果

本研究の機能的な記録例は Fig. 1 のとおりであり、上段からそれぞれ指尖容積脈波(DPG), 指尖容積微分脈波(Δ DPG), フィナプレス血圧, 呼吸数, 心電図(心拍数)を示す。この図からは、指尖部血圧の低下と Δ DPG波の増大, 同血圧の増大と Δ DPG波の減少が対照的に現れていることが観察された。サーミスタ法による呼吸数測定および胸部双極法で心電図をそれぞれ記録し、これらを通じて生理的な諸機能が安定していることを確認できた。また、位置負荷の開始や終了時において動作の記録に Bayliss 効果と思われる現象が観察された。被験者の身体特性は Table 1 に示したとおりである。

A. 位置負荷- Δ DPG 応答

Fig. 2 の縦軸は、心臓位をコントロールとした右手(利き手)の指尖部挙上および垂下の Δ DPG-P

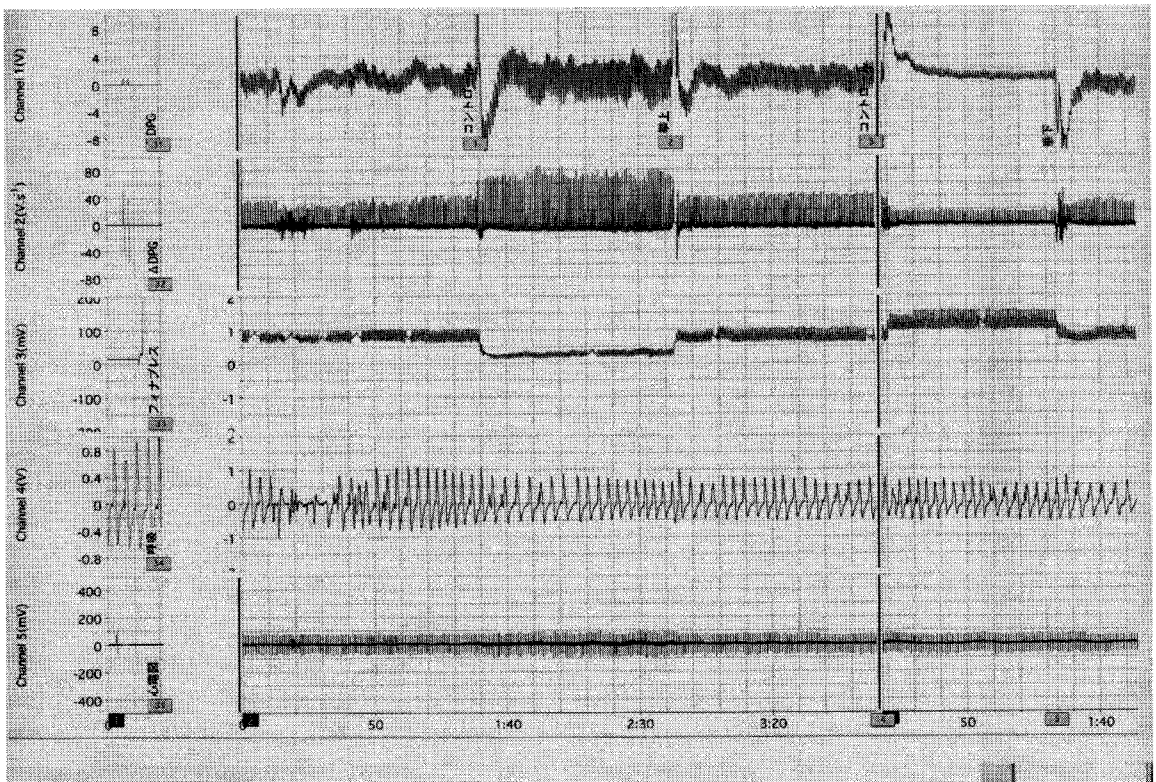


Fig. 1. Typical example of Δ DPG patterns induced by arm position changes in swimmer athlete.

Table 1. Characteristics of subjects

N=6	Height (cm)	Weight (kg)	Blood pressure (mmHg)	Heart rate (bpm)	Age (yr)	Experience (yr)
Swimmers	160.8±6.9	56.7±6.0	117.5±3.1/60.6±6.6	54.0±7.4	19.8±0.9	11.5±1.3
Controls	159.1±3.7	54.5±4.9	108.8±9.8/63.8±10.5	59.0±4.4	22.5±1.5	

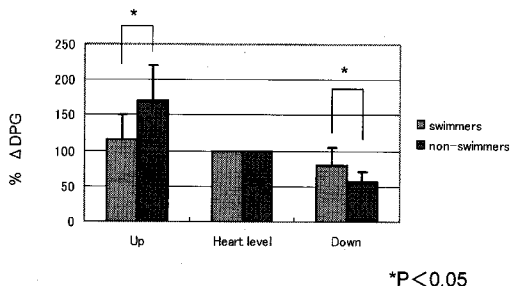


Fig. 2. Changes of delta DPG wave height (%) during arm position loading in swimmers and non-swimmers.

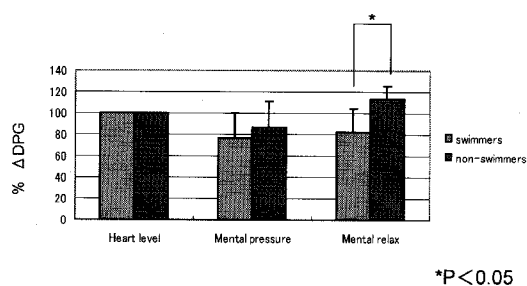


Fig. 3. Changes of delta DPG wave height (%) during image loading in swimmers and non-swimmers.

波高の変化率(%)である。横軸は位置負荷を示し、挙上(up)、心臓位レベル(Heart level)および垂下(down)の順序とした。

心臓位レベルからの上肢挙上では、全被験者が血管拡張性を示した。競泳者の Δ DPGは、右手の上肢挙上で $114.5 \pm 35.5\%$ であり、上肢垂下では $79.5 \pm 25.6\%$ で、血管収縮性を示した。一般成人女性の Δ DPGは、右手の上肢挙上で $170.6 \pm 49.5\%$ であり、上肢垂下において $57.0 \pm 13.4\%$ を示した。競泳者の Δ DPGは、一般成人女性との比較で上肢挙上が有意に低値を示し($p < 0.05$)、上肢垂下が有意に高値を示した($p < 0.05$)。本結果から、競泳者の Δ DPG波高は、一般成人女性より減少した。

B. イメージ負荷- Δ DPG 応答

Fig. 3の縦軸は、右手(利き手)の指尖部を心臓位レベルに置いたイメージ負荷の Δ DPG変化率(%)である。横軸はイメージ負荷を示し、心臓位レベル、緊張イメージ(試合場面)およびリラックスイメージ(休息場面)の順序とした。

競泳者は、緊張イメージ(試合場面)での Δ DPGにおいて、心臓位レベルに対し $76.3 \pm 24.1\%$ の血管収縮性を示した。一般成人女性の緊張イメージ(試合場面)では、 $86.5 \pm 24.5\%$ であった。また、リラックスイメージ(休息場面)で競泳者の Δ DPGは、 $82.3 \pm 21.9\%$ を示し、緊張イメージよりわずかに血管拡張性を示したが、一般成人女性では、 $112.9 \pm 12.8\%$ を示した($p < 0.05$)。競泳者の

Δ DPGでは、リラックスイメージにおいても一般成人女性に観察されたような血管拡張性がみられなかった。

IV. 考 察

本研究は、指尖容積微分脈波(Δ DPG)を用い、位置負荷法で指尖部の動脈血圧に変動を誘起し、この血管内圧の変動に伴う血管緊張の変化を Δ DPGで計測した。その結果、競泳者の位置負荷では細動脈の Δ DPG応答性が一般成人女性に比較して小さい結果となった。一方、イメージ負荷による Δ DPG応答では、競泳者が一般成人女性より血管収縮の応答性が大きいように観察された。以下では、この実験事実を具体的に検討する。

位置負荷法は、筋原性応答を誘発する方法として開発された^{10,15,16})。 Δ DPG波高は、指尖部の血管内圧変動⁹)すなわち心臓位レベルからの上肢垂下とともに指尖部血圧の上昇に対応して波高減少が現れ、また上肢の指尖部挙上による血管内圧の低下に対し波高の増大を示すことが報告されている¹⁵)。Bayliss¹⁾によると細動脈血管の筋組織は、ほかの平滑筋と同様に血管の伸展張力に対し収縮的に作用し、その張力の低減は弛緩となる。血管平滑筋のこの応答性は、Bayliss効果と呼ばれ生体内の血管はもとより死後数時間の摘出動脈においてもみられる¹⁵)。このことから血管平滑筋は筋原性の性質を持ち、この働きによって常に血管に固有の緊張が保た

れている。位置負荷法は、 Δ DPG-P 波高の規則的な変化と生理的な Bayliss 効果との対応で理解されることが可能と思われる^{1,7,8)}。

本研究においても上肢指尖部を挙上したときには、 Δ DPG 波高は増大し、指尖部を垂下したときに Δ DPG 波高の減少が認められた。位置負荷による Δ DPG 応答は、先行研究とほぼ同様な結果を得ることができた^{15,19)}。

前田は、運動中の非活動肢における筋原性応答が亢進する可能性を報告しており、バレーボール選手の利き手や野球選手の非利き手（グローブ装着側）において筋原性の血管拡張作用の減少を報告している^{11,13)}。競泳者の Δ DPG 応答は、一般成人女性と比較して上肢の挙上時も垂下時も応答の変化率が小さくなる傾向にあった。

水泳は、立位運動型とは異なり横臥位運動であるため運動中の循環系血流は水平方向の移動が中心で、循環動態の還流作用に特色があると考えられる。また、競技経験の年数は10年以上であることから、継続的なトレーニングの影響なども考えられる。競泳者の Δ DPG 応答が減少の傾向を示したことについては、これを水泳競技固有の末梢循環系における細動脈の変化に兆しがみられ、トレーニング継続による細動脈の運動適応とみることできるが、今後さらに追求を続ける必要があると思われる。

一方、イメージ負荷では、本研究における精神性の負荷を与えた細動脈応答を観察した。血管平滑筋は、神経系の循環調節因子として交感神経性の血管収縮神経を終末にもっている。全身運動においては精神・神経性の興奮や意欲的な感情が交感神経性の機能を高め、末梢血管系への作用を及ぼしている^{4,6,12)}。

暗算などの意識集中下の精神作業を行ったときの Δ DPG 応答は、有意な減少を示すという報告がある¹⁷⁾。 Δ DPG による減少は、暗算の内容に関係なく、何かに対する注意集中と関係があると考えられている。また、田中らは、スポーツ競技者による緊張型イメージにおいて血管収縮性の応答性がみられ、リラククス型イメージにおいては、血管拡張性の応答がみられたと報告している^{19,20)}。

本研究においても緊張イメージ（試合場面）負荷の際、 Δ DPG 応答は緊張時と同様の血管収縮による

波高の低減がみられた。このことより、イメージを介する精神作業の場合も大脳皮質の活動下で行われていることが、末梢の Δ DPG 応答に影響していると考えられ、細動脈平滑筋の収縮による血管口径の縮小が血流の抵抗増大となって血管床における血流の低下を起こしたものと思われる。競泳者における精神性の刺激の関与は、今後さらに追及が必要と思われる。

以上より、競泳者の位置負荷刺激による Δ DPG 応答は上肢の指尖部挙上で増大し、上肢の指尖部垂下で低下の傾向にあった。位置負荷による血管の収縮・弛緩の応答性は、負荷の規則的な変化と対応しており、筋原性のメカニズムを考察することができる。一方、イメージ負荷による Δ DPG 応答で緊張イメージ（試合場面）の精神作業を行った場合、競泳者は一般成人女性の Δ DPG より血管収縮による波高の低減が強くみられた。イメージ負荷では、末梢への影響として大脳皮質から交感神経系へのシグナルの関与があったと考えられる。

水泳運動の姿勢は、常に横臥位姿勢であり立位運動とは異なる血液循環の体制にあり、水泳競技固有であることが考えられ、これには水平循環・無重量などがトレーニングを継続するあいだに細動脈に影響を及ぼすと考えられる。したがって、発育期からのトレーニングを継続してきたことで細動脈には機能的な変化の兆しがみられ、末梢循環系の運動適応として、さらに検討することができるとと思われる。

V. 結 語

本研究は、女性競泳者6名の末梢循環系の機能に変化が現れるかどうかを観察するため、位置負荷- Δ DPG 応答およびイメージ負荷- Δ DPG 応答の測定とその分析を実施した。位置負荷では、上肢指尖部の心臓位レベルからの挙上は Δ DPG 波高を顕著に増大させ、心臓位レベルからの垂下は Δ DPG を有意に低下させた。さらに、競泳者の指尖部 Δ DPG は、一般成人女性と比較したとき、上肢挙上および垂下のそれぞれの変動量が有意な減少を示した。このことから、競泳者の微小循環系細動脈に対しては、運動性の影響が現れたようにも観察できる。また、競泳者のイメージ負荷- Δ DPG 応答は、緊張イメージを負荷することで波高の低下を得た。これは、血管抵抗の増大すなわち血流の減少を示してお

り、末梢血管網の入り口に位置する細動脈への神経性の調節作用が発現したものと考える。

以上の結果より、位置負荷- Δ DPG 応答では細動脈血管の筋原性機構の動員が観察され、また、イメージ負荷- Δ DPG 応答ではイメージによる中枢神経-交感神経系の発動が関与したと思われる。

参考文献

- 1) Bayliss, W. M.: On the local reaction of the arterial wall to changes of internal pressure. *J. Physiol.*, **28**, 220-231, 1902.
- 2) 深瀬湛子, 前田順一, 下田政博, 鈴木淳一, 竹宮 隆: 位置負荷-指尖血圧応答の分析. *日本運動生理学雑誌*, **1**(1), 107-112, 1994.
- 3) Ganong, W. F.: Review of Medical Physiology, 10th ed., Lange Medical Publications, 1981.
- 4) Henriksen, O.: Local sympathetic reflex mechanism in regulation of blood flow in human subcutaneous adipose tissue. *Acta Physiol. Scand.*, **101**(Suppl. 450), 1-48, 1977.
- 5) 石河利寛, 竹宮 隆編: 持久力の科学. 運動生理学シリーズ, pp. 53-75, 東京, 杏林書院, 1997.
- 6) 岩原信九郎著: 生理心理学, pp. 52-56, 東京, 星和書店, 1981.
- 7) Jonson, P. C.: The myogenic response. In: *Handbook of Physiology*, ed. by Bohhr, D. F., Somolyo, A. P. and Sparks, H. V., Sect. 2, The Cardiovascular Systems, Vol. II, Vascular smooth muscle, American Physiological Society, Bethesda, Maryland, pp. 409-442, 1980.
- 8) Jonson, P. C.: Myogenic mechanisms of blood flow regulation. In: *Vasodilatation*, ed. by Vanhoutte, P. M. and Leuse, I., Raven Press, New York, pp. 255-262, 1981.
- 9) Levick, J. R. and Michel, C. C.: The effects of position and skin temperature on the capillary pressure in the fingers and toes. *J. Physiol.*, **274**, 97-109, 1978.
- 10) 前田順一, 竹宮 隆: レーザー組織血流計および双方向性超音波血流計による位置負荷-末梢循環の分析. *体力科学*, **39**, 106-113, 1990.
- 11) Maeda, J. and Takemiya, T.: Microvascular response to gravity in the finger of volleyball and baseball players, ed. by Tsuchiya, M. *et al.*, *Microcirculation Annual 1991*, Nihon Igakukan, Tokyo, pp. 165-166, 1991.
- 12) 間野忠明: 教育講座「運動と自律神経」. *体力科学*, **43**, 130-135, 1994.
- 13) Suzuki, J., Maeda, J., Nishihara, Y., Kunugi, Y. and Takemiya, T.: Differential digital plethysmographic analysis of finger vascular response to changes in arm position in baseball players. *Adv. Exerc. Sports Physiol.*, **1**, 15-21, 1995.
- 14) 戴 鶴峰, 豊嶋建広, 中野昭一, 清田 寛, 大和 眞: ドプラエコー法を用いたスポーツ競技者の心臓・動脈系の特徴について. *体力科学*, **51**, 457-464, 2002.
- 15) 竹宮 隆, 前田順一, 安藤真太郎, 宮崎純一: 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, 1989.
- 16) 竹宮 隆: 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, 1990.
- 17) 竹宮 隆: 末梢循環からみた運動と脳と心. *日本運動生理学雑誌*, **3**, 161-166, 1996.
- 18) 竹宮 隆, 石河利寛: 運動適応の科学. 運動生理学シリーズ, pp. 92-107, 東京, 杏林書院, 1998.
- 19) 田中幸夫, 江口和美, 伊藤 孝, 前田順一, 竹宮 隆: 武道およびスポーツ熟練者の指尖容積微分脈波分析からみた運動適応に関する一考察. *日本体育大学紀要*, **33**(2), 79-85, 2004.
- 20) 田中幸夫, 江口和美, 伊藤 孝, 竹宮 隆: 剣道熟練者の位置負荷およびイメージ負荷時の指尖容積微分脈波分析. *体力科学*, **53**, 235-244, 2004.