交感神経に調節された血管トーン評価のための 指動脈コンプライアンス-血圧関数の応用^{1,2}

札幌医科大学 田中豪³・澤田幸展・北星学園大学 松村健太⁴・
札幌医科大学 長野祐一郎⁵・金沢大学 山越憲一

Application of finger arterial compliance-blood pressure function for an evaluation of the sympathetically mediated vascular tone

Gohichi Tanaka, Yukihiro Sawada (Department of Psychology, School of Medicine, Sapporo Medical University, Chuo-ku, Sapporo 060-8556), Kenta Matsumura (Department of Psychology for Well-being, School of Social Welfare, Hokusei Gakuen University, Ohyaichi, Atsubetsu-ku, Sapporo 004-0042), Yuichiro Nagano (Department of Psychology, School of Medicine, Sapporo Medical University, Chuo-ku, Sapporo 060-8556), and Ken-ichi Yamakoshi (Department of Human and Mechanical Systems Engineering, Faculty of Engineering, Kanazawa University, Kodatsuno, Kanazawa 920-8667)

Normalized pulse volume (NPV, Sawada, Tanaka, & Yamakoshi, 2001) was calculated on a beat-to-beat basis by dividing the ac component by the dc component in near-infrared finger photoplethysmogram. Finger arterial compliance index (CI) was obtained by dividing NPV by the respective pulse pressure. Twelve female subjects underwent immersions of the contralateral hand in water at two different temperatures (44°C, 22°C). During the last 3 min of each of the 8-min resting and immersion conditions, CI was measured for the finger position at heart level, 15 cm, and 30 cm below the heart for 1 min each. Results indicated that a negatively linear regression could be applied to the beat-to-beat data on log CI and mean blood pressure (MBP) over the three finger position (whole regression). CI calculated at 90 mmHg (CI 90) was arbitrarily chosen as a reference point for comparing compliance among conditions. CI 90 decreased significantly during the 22°C condition. In conclusion, CI seemed more valid as an index of the finger arterial vascular tone through the removal of MBP influence.

Key words: finger plethysmogram, vascular tone, arterial compliance, blood pressure, skin temperature.

光電式指尖容積脈波 (finger photoplethysmogram: FPG) は心理的なストレスや情動でことのほか鋭敏に変化する生理反応として、心理生理学研究では古くから用いられてきた (Bloom & Trautt, 1977; Miller & Ditto, 1989, 1991; Smith, Houston, & Zurawski, 1984; Stemmler, 1989). FPG における代表的な指標である容積脈 (pulse volume: PV) は脈動する動脈の容積変化を間接的に反映する指標である (山崎, 1985). この脈動の容積は、 α アドレナリン作動性の交感神経緊張に調節された機能的な末梢血管トーンだけでなく、動脈に機械的に作用する血圧にも影響される。したがって、動脈の弾性特性、すなわち、血圧変化に対する容積変化の比をあらわすコンプライアンスを測定

し、血圧に対する関数関係を描くならば、容積だけの測定に比較して一層特異的に機能的な血管トーンを評価するための基礎資料が得られる。

血管の弾性特性は、身体各部の動脈の器質的な硬さを測定するために、広く応用されてきた。動脈硬化や高血圧、そして、加齢によって弾性特性-圧関係は変動を示す (Aggoun, Bonnet, Sidi, Girardet, Brucker, Polak, Safar, & Levy, 2000; Barenbrock, Spieker, Kerber, Vielhauer, Hoeks, Zidek, & Rahn, 1995; Benetos, Laurent, Hoeks, Boutouyrie, & Safar, 1993; Boutouyrie, Laurent, Girerd, Benetos, Lacolley, Abergel, & Safar, 1995; Giannattasio, Mangoni, Failla, Carugo, Stella, Stefanoni, Grassi, Vergani, & Mancina, 1996; Lucini, Milani, Ventura, Mehra, Messerli, & Pagani, 2000). 器質的な評価の目的からすれば、機能的な血管トーン変動は誤差要因になるが (Seki, 1988), それ自身、ストレスへの自律神経の反応性を知るためには有用である (Boutouyrie, Lacolley, Girerd, Beck, Safar, & Laurent, 1994; Lopez-Beltran, Blackshear, Finkelstein, & Cohn, 1998).

橈骨動脈や頸動脈などの中程度の太さの動脈では、超音波エコー図によって動脈の径を測定し、それを基

¹ 本研究の一部は Society for Psychophysiological Research 第 41 回年次大会 (Montreal, Canada, 2001) において発表した。

² 本研究は、平成 13 年度文部科学省科学研究費補助金 (基盤研究 C2, 課題番号 13610092, 代表者澤田幸展) の助成を受けた。

³ 脈波計測装置に関する技術的援助に対して中川原実博士 (株式会社メディセンス) に深謝いたします。

⁴ 現所属：北海道大学大学院文学研究科。

⁵ 現所属：早稲田大学医療行動科学研究所。

に弾性特性が算出されてきた (Bulpitt, Rajkumar, & Cameron, 1999; Tardy, Meister, Perret, Brunner, & Ardit, 1991)。一方, 指尖部細動脈の弾性特性は, 定量化理論上問題の多い PV やパルスオキシメータによる容積指数を採用してきたために, 相対値しか測定できなかった (Bochmann, Reuter, List, Grundig, & Sinz, 1995; Jespersen, Krusell, & Lederballe, 1987; Lopez-Beltran et al., 1998; Marc, Potocnik, & Starc, 2000; Shelley, Murray, & Chang, 1997)。しかし山越らは, 光が溶液中を通過する際の吸収は溶液の濃度と液層の厚さに比例する, とのランバート・ベールの法則を指尖部に応用した上で指動脈弾性係数を測定し, 加齢と病態の影響を明らかにした (Ando, Kawarada, Shibata, Yamakoshi, & Kamiya, 1991; Kawarada, Shimazu, Yamakoshi, & Kamiya, 1986; Shimazu, Yamakoshi, & Kamiya, 1986; Yamakoshi, & Kamiya, 1987)。

我々は, 山越グループの研究を基礎に, 指血管脈動容積の新しい指標として規準化脈波容積 (normalized pulse volume: NPV) を提唱してきたが (Sawada, Tanaka, & Yamakoshi, 2001; Tanaka, Kawana, Sawada, & Yamakoshi, 2002a), 本論文では, NPV から算出される新しいコンプライアンス指数 (compliance index: CI) を提唱し, これが指尖部血管トーマスの指標として優れていることを示す。そのために, 静水圧により動脈血圧を広範囲に操作することで CI-血圧関数を測定し, 交感神経の緊張状態によって血管トーマス変動する温冷水浸漬条件下 (Mohan & Marshall, 1994; Taylor, Johnson, O'Leary, & Park, 1984) で関数の変化を調べた。

方 法

被験者 心血管系に疾患の既往歴がない健康な女子大学生 12 名 (21.0±1.0 歳) を被験者とした。

脈波測定理論 NPV の理論に関してはすでに他の論文で詳細に議論したので (Sawada et al., 2001; Shimazu et al., 1986; Tanaka, Sawada, & Yamakoshi, 2000), ここでは簡略に記載する。指尖部にランバート・ベール法則を適用すれば,

$$\Delta V_a = (\epsilon C)^{-1} \Delta I_a / I \quad (1)$$

ここで, ΔV_a は動脈の脈動容積, ΔI_a と I はそれぞれ透過した光量電圧の脈動分と直流分である。指尖部を還流する動静脈血を平均した平均吸光定数は ϵ , 血液の濃度は C で示される (通常はヘモグロビン濃度のヘマトクリットとみなせる)。右辺の $\Delta I_a / I$ は $(\epsilon C)^{-1}$ を介して ΔV_a と正比例の関係にあり, NPV と定義される ($NPV = \Delta I_a / I$)。

本研究で新たに採用した波長 810 nm の時, 酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンの吸光係数は一致するので (Van Assendelft, 1970), その平均である

ϵ は動脈血と静脈血の混合割合が被験者内, 被験者間でどのように変動しても一定の常数である。唯一の未知変数 C に関しては, 心理的なストレス負荷時の変動はせいぜい数%にとどまるので (Allen & Patterson, 1995; Muldoon, Bachen, Manuck, Waldstein, Bricker, & Bennett, 1992), 近似的に一定とみなして実際上は差し支えない。したがって, $(\epsilon C)^{-1}$ は定数と考え得る。

動脈コンプライアンスは $\Delta V_a / \Delta P$ で与えられるが, ΔV_a と比例関係にある NPV を用いれば, コンプライアンス指数は,

$$CI = NPV / PP \quad (2)$$

と定義される。ここで, $\Delta P = PP$ は脈圧 (pulse pressure (mmHg)) を意味する。

生理反応の測定と装置 波長 810 nm の発光ダイオード (L 810-40K00, エピス電子, 大阪) を光源, フォトダイオード (HPI-2464R5, 光電子工業研究所, 東京) を受光センサーとしてそれぞれ左手第 2 指末節部の背側と腹側に対面して装着し, 透過した光量を自作脈波増幅装置で ac 増幅した波形 (時定数 1 s, ゲイン 100 倍) と dc 増幅した波形を記録した。連続血圧 (mmHg) は左手第 3 指中節部からフィナプレスで測定した (Ohmeda 2300, Ohmeda Monitoring Systems, Englewood, Colorado, USA)。皮膚血流量 (cutaneous blood flow: CBF (ml/min/100 g)) は左手第 4 指末節腹側からレーザードップラー血流計 (FLO-C1, オメガウェーブ, 東京) で測定した。これら 4 連続波形は, 生体アンプ (1253 A, NEC メディカルシステムズ, 東京) を経由してサンプリングタイム 1 ms, 16 bit で AD 変換された。PC での分析には波形信号処理言語 LabVIEW ver. 5.1 (National Instruments, Austin, Texas, USA) を利用した。

1 心拍ごとに算出された血行力学指標は平均血圧 (mean blood pressure: MBP (mmHg)), PP, CBF, および皮膚血管抵抗 (cutaneous vascular resistance: CVR (mmHg/ml/min/100 g) = MBP/CBF) であり, 同じく脈波関連指標は NPV と CI であった。

手続き 被験者は実験の説明と同意の後, 防音シールド室に入室して着席した。センサー類を装着後, 安静休息, 44°C の温水に反対側の右手を手首まで浸ける温水浸漬, 同じく 22°C を用いた弱冷水浸漬の順にそれぞれ 8 分間実施した。冷水と温水の水温調整と浸漬のために恒温水槽 (NCB 1000, 東京理化器械, 東京) を用いた。いずれの 8 分間も 2 分目からと 5 分目からのそれぞれ 1 分間は左手を心臓の高さに調整した台に置かせた。同じく, 3 分目からと 6 分目からのそれぞれ 1 分間は心臓位置 -15 cm の高さの台に, 4 分目からと 7 分目からのそれぞれ 1 分間は心臓位置 -30 cm の高さの台に手を置かせた。そして, いずれの 8 分間の測定も, 最後の 3 分間の資料を分析の対象とし, こ

れらを、それぞれ三つの指位置条件（心臓位置条件， -15 cm 条件， -30 cm 条件）を伴う三つの温度条件（安静条件， 44°C 条件， 22°C 条件）と定義した。

統計解析 回帰と相関分析では1心拍ごとの測定値をそのまま，温度条件と指位置条件の条件差の分析では各1分間の平均値を使用した。ただし，NPVとCI

については対数変換を行い，データの正規化を試みた（Sawada et al., 2001; Tanaka et al., 2000）。平均値の有意性検定には，それぞれの分析で目的とする要因について2要因または1要因の繰り返しのある分散分析を一般線形モデル手続き（GLM）により実施した。GreenhouseとGeisserの ϵ 補正を自由度に施し，有

Figure 1. Means of hemodynamic measures for each finger position (heart level, -15 cm , -30 cm) under different temperature conditions (Rest, 44°C , 22°C). Mean blood pressure (MBP, left), cutaneous blood flow (CBF, center), and cutaneous vascular resistance (CVR, right) are presented.

Figure 2. Beat-to-beat plots of compliance (CI) against mean blood pressure (MBP) under different temperature conditions.

意水準は5%と1%を使用した。そして、必要な下位検定では Tukey 法を用い有意水準 5%に固定した。いずれの分析でも SPSS 統計パッケージを使用した (Release 10.0 J: SPSS Inc., Chicago, IL., USA)。

結 果

指尖部血行力学の分析 指尖部血行力学指標である MBP, CBF, CVR について全被験者の平均値を温度条件, 指位置条件別に示す (Figure 1)。MBP では位置の主効果 ($F(2, 20)=172.72, \epsilon=.72, p<.01$) だけが有意であり, 下位検定では 3 条件すべての差に有意性が認められた。温度条件を平均すると, 心臓位置の MBP 86.4 mmHg に対する -15 cm と -30 cm 条件での昇圧はそれぞれ, +12.4, +26.3 mmHg であり, 血

液の比重を 1.05 とすれば静水圧 (0.77 mmHg/cm, Burton, 1972) による理論上の予測値 +12.2, +24.3 mmHg とよく一致していた。次に, CBF では温度条件の主効果 ($F(2, 20)=14.72, \epsilon=.65, p<.01$) だけが有意であり, 下位検定では 22°C 条件が安静および 44°C 条件に比べて有意に低値を示していた。そして, CVR では温度条件 ($F(2, 20)=6.65, \epsilon=.52, p<.05$) と位置条件 ($F(2, 20)=6.71, \epsilon=.69, p<.05$) の主効果に有意性を認め, 温度条件では 22°C と安静および 44°C の間に, 位置条件では心臓位置と -30 cm の間に有意差が認められた。

CI-MBP 関数の分析 (全体回帰) 1 心拍ごとの MBP に対する CI を, 各温度条件ごとに三つの指位置条件すべてについて典型的な 2 名で示す (Figure 2)。CI の対数変換値は MBP に対して直線回帰を示したが, 温度条件別に求めた相関係数を被験者 12 名の最大値, 最小値, 中央値の順に示せば, 安静

Figure 3. Regression slope and the estimated compliance index at the point of 90 mmHg of mean blood pressure (CI 90) for each temperature condition. Changes are shown in each subject (solid lines) with the means for all subjects (bold lines).

Figure 5. Mean regression slopes of mean blood pressure-compliance index function, calculated overall vs. within finger position in each temperature condition.

Figure 4. Beat-to-beat plots of compliance (CI) against mean blood pressure (MBP) in two typical subjects (S06 and S11) within finger position (heart level, -15 cm, -30 cm) under a certain temperature condition (22°C in S06 and 44°C in S11).

($-.97, -.38, -.87$), 44°C ($-.97, -.65, -.88$), 22°C ($-.96, -.57, -.86$)であり、高い負の相関が一貫して認められた。任意のMBPとして血圧変動幅のほぼ中央となる90 mmHgを選び、それぞれの回帰直線上におけるMBP 90 mmHgに対するCI推定値を算出してCI 90と定義した。そして、温度条件のCI 90並びに回帰直線の勾配に対する影響を調べた。CI 90については温度条件の主効果 ($F(2, 22) = 17.25, \varepsilon = .95, p < .01$) が有意であり、下位検定では 22°C 条件が安静および 44°C 条件に比べて有意に低値を示していた。しかし、回帰の勾配では、温度条件の違いは有意な効果をもたらさなかった ($F(2, 22) = 0.05, \varepsilon = .88, p > .1$) (Figure 3)。

全体回帰対位置条件内回帰 位置条件を通してみた上述の全体回帰に対して、位置条件内の回帰では勾配のより急峻な場合が多くみられた。被験者2名の散布図をFigure 4に例示する。そこで、回帰の勾配を位置条件内と全体で比較するために、はじめに、位置条件内の回帰の勾配について、温度条件と指位置条件を2要因とするGLMを行った。その結果、二つの主効果と交互作用のいずれにも有意性が認められなかった。次に、位置条件内の勾配を被験者ごとに三つの温度条件で平均した(平均位置条件内勾配)。そして、温度条件×全体対部分(全体回帰対位置条件内回帰)を2要因とするGLMを実施した。その結果、全体対部分の主効果にだけ有意性が認められ ($F(1, 11) = 6.94, p < .05$)、位置条件内の回帰勾配は全体回帰の勾配に比べて急峻なことが確認された (Figure 5)。

さらに、位置条件内のCIの変動の特徴を分析するために、位置条件内のCIの変動の標準偏差を被験者ごと、温度条件ごと、位置条件ごとに計 $12 \times 3 \times 3$ 個算出した。また、同様にして、CIとMBPの相関係数を同数個算出しFisher変換で正規化した。これら2種類の指標と位置条件内のCI-MBP回帰勾配との相関をそれぞれ求めたところ、前者では $r = -.53 (p < .01)$ 、後者では $r = +.65 (p < .01)$ の有意な相関が認められた。

考 察

静水圧法による血圧の変化量と理論上の予測値との高い一致度に加え、指位置3条件を通した全体回帰に認められたMBPとの高い相関は、血圧操作法としての静水圧法の信頼性と有効性 (Katayama, Shimoda, Maeda, & Takemiya, 1998; Suzuki, Maeda, & Takemiya, 1994) を裏づけるものである。そして、CIの対数変換値がMBPに対して直線回帰を示したことから、血管弾性特性はMBPに対して指数関数に従うこと (Lopez-Beltran et al., 1998) が再確認された。

PVなどの伝統的な容積関連指標を用いて氷水の寒冷昇圧試験を実施した研究 (Lopez-Beltran et al.,

1998)と同様に、血管弾性特性-圧関数が 22°C の弱い冷水浸漬でも有意な変動を示したことは、CIの優れた感度を示唆している。しかし、むしろ本研究の最大の成果は、絶対値近似が可能な新しい弾性特性指標CIの導入によって指尖部血管トーンスのより正確な定量的評価を可能にしたことにある。特に、任意の圧における弾性特性推定値として算出されたCI 90はMBPの影響を一定に統制した血管トーンスの正確な指標となる (Boutouyrie et al., 1994)。生心理学的な様々な応用場面で、血管トーンスの変動は常に血圧の変動を伴うと予想されるが、血圧変動の影響を除去できれば血圧と真の血管トーンスの変動を独立に評価でき、それらの真の関係もはじめて正確に分析することができる。

冷水浸漬の影響でCI 90が減少した 22°C 条件でもCI-MBP回帰の勾配は有意には変化せず、CI-MBP直線は血管トーンスの増加に対して下方に平行移動すると考えられる。冷水浸漬以外の様々なストレス負荷時にも同様な平行移動が普遍的に認められるのであれば、真の血管トーンスの評価法としてのCI 90の妥当性は一層確実に保証されることになる。この問題については今後の研究が必要だが、我々の予備的な分析では、本研究の 22°C 浸漬時と同様に、安静時のCI-経壁圧関数は暗算ストレス負荷時に下方に平行移動することが確認されている (Tanaka, Sawada, Matsumura, Nagano, & Yamakoshi, 2002b)。

指尖部の血行力学の面から静水圧の影響に言及すれば、一般に、MBPが増加するほど血管は内側からの強い圧を受けて動脈は広がり動脈容積 V_a は増加する一方、血管壁平滑筋は筋原性の自己調節によって収縮して硬化し (Katayama et al., 1998; Suzuki et al., 1994)、脈動部分つまり ΔV_a は減少する。逆にカフ圧による外圧を徐々に加え、血管壁にかかる経壁圧 (=MBP-カフ圧) を減少させるほどコンプライアンスは増加し、カフ圧と血圧が一致した無負荷状態では最大値を示す (Yamakoshi, Shimazu, Shibata, & Kamiya, 1982)。本研究では、MBPは指位置3条件間の静水圧変化に合わせて増減したが、血流量CBFは一定に保持されていた。全身の場合と同じく指尖部でも $\text{MBP} = \text{CBF} \times \text{CVR}$ の関係が成り立つので、変化したMBPのもとで一定のCBFを保つのに見合うCVRの増減が実現され、その生理機序として自己調節が働くと考えられる。

一方、温冷水浸漬の場合、静水圧が変化した場合とは明瞭に異なるCBF, CVR, MBPの変化パターンが認められた。温冷水浸漬負荷では、MBP水準は全身性に変化し、心拍出量と全身の動脈の平均的な収縮状態すなわち総末梢抵抗が決まってくるが、昇圧の程度は静水圧の影響ほどには大きくならず小幅なものにとどまると考えられる。指尖部についてみれば、血管収

縮は CBF を減少させ血管トーマスの増加は CVR を増加させるが、これらは相殺されて MBP の小幅な上昇と整合的であった。

また、指位置条件内の CI-MBP 回帰勾配が全体回帰勾配より急峻であったことは、交感神経活動の自発的な変動が CI の血管トーマス変動に反映した結果と考えられる。この時も 22°C 条件での持続的なトーマス変化の場合と同様に CBF の減少と CVR の増加は相殺しあう結果、MBP の変化は少ないといえる。そして、CI の変動がより大幅であっても（より大きい CI 標準偏差）、CBF と CVR の相殺する関係によって血圧変動幅はそれほどには増加せず、結果としてより急峻な CI-MBP 回帰勾配が得られたのであろう。また、CI のより大幅な変動は全身的な血管抵抗と共変動すると考えられ、後者は MBP を決定づけるため、より高い CI-MBP 相関につながったと説明できる。

本研究の限界として二つの問題点を指摘しておく。第 1 に、C、血管の太さ、および、器質的な血管の硬さの影響である。C の影響度は既述のごとく軽度なものともなせるが (Allen & Patterson, 1995; Muldoon et al., 1992)、血管の太さと器質的な弾性は CI に大きな影響を及ぼすと予想される。そして将来、これら器質的要因と機能的な要因の血管弾性特性への影響を分離して評価できるようになれば、心血管系の加齢変化や病態の兆候をごく初期の段階でとらえるという、さらに発展的な目的に CI の応用が広げられよう (田中, 2001)。第 2 に、生理心理学研究での実用性の問題が挙げられる。静水圧法は測定する手を上下するだけの無侵襲かつ簡便な方法であり、実験室研究では極めて容易に施行できる点が長所であるところから、血圧 (経壁圧) の操作法としてのカフ圧迫法 (Shimazu et al., 1986; Tanaka et al., 2002b) より優れる。しかし、血圧、できればその連続的測定が必須である点は特に将来のアンビュラトリー計測への応用では大きい制約となろう。脈波関連情報の測定だけから近似的にでも CI-MBP 関数が得られるならば CI の応用可能性は一層拡張されると期待できよう (Tanaka & Sawada, 2003)。これらの問題の解決は今後の研究に残された。

結 論

指位置 3 条件を通してみると、1 心拍ごとの CI の対数変換値と MBP の間には直線回帰が適合した (全体回帰)。安静、44°C、22°C 条件間で全体回帰の勾配には有意差が認められなかったもので、任意の血圧に対する CI 推定値としての CI 90 は MBP の広い変動範囲にわたる真の動脈トーマスの変異を表現する指標となる。そして、血圧を広範囲に操作する手法としての静水圧法は極めて簡便であり、心理生理学実験への応用は容易と考えられた。

引用文献

- Aggoun, Y., Bonnet, D., Sidi, D., Girardet, J. P., Brucker, E., Polak, M., Safar, M. E., & Levy, B. I. 2000 Arterial mechanical changes in children with familial hypercholesterolemia. *Arteriosclerosis, Thrombosis & Vascular Biology*, **20**, 2070-2075.
- Allen, M. T., & Patterson, S. M. 1995 Hemoconcentration and stress: A review of physiological mechanisms and relevance for cardiovascular disease risk. *Biological Psychology*, **41**, 1-27.
- Ando, J., Kawarada, A., Shibata, M., Yamakoshi, K., & Kamiya, A. 1991 Pressure-volume relationships of finger arteries in healthy subjects and patients with coronary atherosclerosis measured non-invasively by photoelectric plethysmography. *Japanese Circulation Journal*, **55**, 567-575.
- Barenbrock, M., Spieker, C., Kerber, S., Vielhauer, C., Hoeks, A. P., Zidek, W., & Rahn, K. H. 1995 Different effects of hypertension, atherosclerosis and hyperlipidaemia on arterial distensibility. *Journal of Hypertension*, **13**, 1712-1717.
- Benetos, A., Laurent, S., Hoeks, A. P., Boutouyrie, P. H., & Safar, M. E. 1993 Arterial alterations with aging and high blood pressure: A noninvasive study of carotid and femoral arteries. *Arteriosclerosis & Thrombosis*, **13**, 90-97.
- Bloom, L. J., & Trautt, G. M. 1977 Finger pulse volume as a measure of anxiety: Further evaluation. *Psychophysiology*, **14**, 541-544.
- Bochmann, R. P., Reuter, U., List, A., Grundig, M., & Sinz, V. 1995 Compliance of the digital artery is decreased in patients with essential hypertension. *Journal of Human Hypertension*, **9**, 627-631.
- Boutouyrie, P., Lacolley, P., Girerd, X., Beck, L., Safar, M., & Laurent, S. 1994 Sympathetic activation decreases medium-sized arterial compliance in humans. *American Journal of Physiology*, **267**, H1368-H1376.
- Boutouyrie, P., Laurent, S., Girerd, X., Benetos, A., Lacolley, P., Abergel, E., & Safar, M. 1995 Common carotid artery stiffness and patterns of left ventricular hypertrophy in hypertensive patients. *Hypertension*, **25**, 651-659.
- Bulpitt, C. J., Rajkumar, C., & Cameron, J. D. 1999 Vascular compliance as a measure of biological age. *Journal of the American Geriatrics Society*, **47**, 657-663.
- Burton, A. C. 1972 *Physiology and biophysics of the circulation*. 2nd ed. Chicago: Year Medical Publishers. Pp. 97-114.
- Giannattasio, C., Mangoni, A. A., Failla, M., Carugo, S., Stella, M. L., Stefanoni, P., Grassi, G., Vergani, C., & Mancia, G. 1996 Impaired radial artery compliance in normotensive subjects with familial hypercholesterolemia. *Atherosclerosis*, **124**, 249-260.

- Jespersen, L. T., Krusell, L. R., & Lederballe, O. 1987 Photoplethysmographic assessment of digital arterial compliance in the diagnosis and treatment of hypertension. *Journal of Clinical Hypertension*, **3**, 368-376.
- Katayama, K., Shimoda, M., Maeda, J., & Takemiya, T. 1998 Endurance exercise training increases peripheral vascular response in human fingers. *Japanese Journal of Physiology*, **48**, 365-371.
- Kawarada, A., Shimazu, H., Yamakoshi, K., & Kamiya, A. 1986 Noninvasive automatic measurement of arterial elasticity in human fingers and rabbit forelegs using photoelectric plethysmography. *Medical & Biological Engineering & Computing*, **24**, 591-596.
- Lopez-Beltran, E. A., Blackshear, P. L., Finkelstein, S. M., & Cohn, J. N. 1998 Non-invasive studies of peripheral vascular compliance using a non-occluding photoplethysmographic method. *Medical & Biological Engineering & Computing*, **36**, 748-753.
- Lucini, D., Milani, R. V., Ventura, H. O., Mehra, M. R., Messerli, F., & Pagani, M. 2000 Study of arterial and autonomic effects of cyclosporine in humans. *Hypertension*, **35**, 1258-1263.
- Marc, O., Potocnik, N., & Starc, V. 2000 Non-invasive beat-to-beat determination of changes in the small artery compliance after smoking. *Pflugers Archiv-European Journal of Physiology*, **439**, R211-R212.
- Miller, S. B., & Ditto, B. 1989 Individual differences in heart rate and peripheral vascular responses to an extended aversive task. *Psychophysiology*, **26**, 506-513.
- Miller, S. B., & Ditto, B. 1991 Exaggerated sympathetic nervous system response to extended psychological stress in offspring of hypertensives. *Psychophysiology*, **28**, 103-113.
- Mohan, J., & Marshall, J. M. 1994 Responses evoked in the forearm vasculature on normal human subjects on repetition of mild, indirect cooling. *Clinical Autonomic Research*, **4**, 29-34.
- Muldoon, M. F., Bachan, E. A., Manuck, S. B., Waldstein, S. R., Bricker, P. L., & Bennett, J. A. 1992 Acute cholesterol responses to mental stress and change in posture. *Archives of Internal Medicine*, **152**, 775-780.
- Sawada, Y., Tanaka, G., & Yamakoshi, K. 2001 Normalized pulse volume (NPV) derived photoplethysmographically as a more valid measure of the finger vascular tone. *International Journal of Psychophysiology*, **41**, 1-10.
- Seki, K. 1988 Noninvasive measurement of elastic properties in human finger arteries: clinical data comparing blood pressure and funduscopic examination. *Heart & Vessels*, **4**, 221-228.
- Shelley, K. H., Murray, W. B., & Chang, D. 1997 Arterial-pulse oximetry loops: a new method of monitoring vascular tone. *Journal of Clinical Monitoring*, **13**, 223-228.
- Shimazu, H., Yamakoshi, K., & Kamiya, A. 1986 Noninvasive measurement of the volume elastic modulus in finger arteries using photoelectric plethysmography. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **33**, 795-798.
- Smith, T. W., Houston, B. K., & Zurawski, R. M. 1984 Finger pulse volume as a measure of anxiety in response to evaluative threat. *Psychophysiology*, **21**, 260-264.
- Stemmler, G. 1989 The autonomic differentiation of emotions revisited: Convergent and discriminant validation. *Psychophysiology*, **26**, 617-632.
- Suzuki, J., Maeda, J., & Takemiya, T. 1994 Analysis of microvascular responses in the finger to changes in arm position during cold water stimulation. *Japanese Journal of Physiology*, **44**, 181-191.
- 田中豪一 2001 ストレス評価のパラダイム——心臓血管系指標、反応型と疾病の前駆症状——特集心のはたらきを評価する生理心理学の実験パラダイム 生理心理学と精神生理学, **19**, 53-60.
(Tanaka, G. 2001 Noninvasive indices, reactivity types and the early markers of cardiovascular disease. *Japanese Journal of Physiological Psychology and Psychophysiology*, **19**, 53-60.)
- Tanaka, G., Kawana, S., Sawada, Y., & Yamakoshi, K. 2002a Evaluation of pre-operative anxiety and propofol-induced sedation using newly proposed indices of finger vascular tone. *Japanese Psychological Research*, **44**, 91-98.
- Tanaka, G., & Sawada, Y. 2003 Examination of normalized pulse volume-blood volume relationship: toward a more valid estimation of the finger sympathetic tone. *International Journal of Psychophysiology*, **48**, 293-306.
- Tanaka, G., Sawada, Y., Matsumura, K., Nagano, Y., & Yamakoshi, K. 2002b Finger arterial compliance as determined by transmission of light during mental stress and reactive hyperaemia. *European Journal of Applied Physiology*, **87**, 562-567.
- Tanaka, G., Sawada, Y., & Yamakoshi, K. 2000 Beat-by-beat double-normalized pulse volume derived photoplethysmographically as a new quantitative index of finger vascular tone in humans. *European Journal of Applied Physiology*, **81**, 148-154.
- Tardy, Y., Meister, J. J., Perret, F., Brunner, H. R., & Arditi, M. 1991 Non-invasive estimate of the mechanical properties of peripheral arteries from ultrasonic and photoplethysmographic measurements. *Clinical Physics & Physiological Measurement*, **12**, 39-54.
- Taylor, W. F., Johnson, J. M., O'Leary, D., & Park, M. K. 1984 Effect of high local temperature on reflex cutaneous vasodilation. *Journal of Applied Physiology*

- ogy, **57**, 191-196.
- Van Assendelft, O. W. 1970 *Spectrophotometry of haemoglobin derivatives*. Assen, the Netherlands: Royal Vangorcum Publisher. Ch. 3. Pp. 47-73.
- Yamakoshi, K., & Kamiya, A. 1987 Noninvasive measurement of arterial blood pressure and elastic properties using photoelectric plethysmography technique. *Medical Progress through Technology*, **12**, 123-143.
- Yamakoshi, K., Shimazu, H., Shibata, M., & Kamiya, A. 1982 New oscillometric method for indirect measurement of systolic and mean arterial pressure in the human finger. Part 1: model experiment. *Medical & Biological Engineering & Computing*, **20**, 307-313.
- 山崎勝男 1985 脈波 宮田 洋・藤沢 清・柿木昇治(編) 生理心理学 朝倉書店 Pp. 88-97.
- (Yamazaki, K. 1985 Plethysmogram. In Y. Miyata, K. Fujisawa & S. Kakigi (Eds.), *Physiological psychology*. Tokyo: Asakura Shoten. Pp. 88-97.)
- 2002. 3. 4 受稿, 2002. 11. 2 受理——