

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：32610

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870710

研究課題名(和文)非接触体表圧刺激による知覚閾値評価システムの開発

研究課題名(英文)Development and evaluation of a perception threshold assessment system using non-contact air pressure stimulation

研究代表者

瀬野 晋一郎(Seno, Shin-ichiro)

杏林大学・保健学部・講師

研究者番号：70439199

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：糖尿病性神経障害などに対する定量的評価方法には電流知覚閾値、神経伝導速度、アキレス腱反射などがある。これらの評価法は皮膚面に刺激電極や測定用器具を直接接触させて計測・評価を行う。我々は2種類の空気噴流(定常流とパルス噴流)を用いて非接触的手法による新たな定量評価システムを開発し、定常流の流量[mL/s]とパルス噴流の推定動圧[Pa]から知覚閾値を算出した。

試作システムを用いて24名のボランティア学生を対象に実施した結果、右前腕部の定常流と推定動圧の閾値は $51 \pm 20$  mL/s、 $285 \pm 282$  Paであった。今後は、標準的な測定を確立するために幅広い年齢層や患者群の測定も必要である。

研究成果の概要(英文)：Many quantitative sensory testing methods for assessing peripheral nerve functions require the direct contact on the body surface such as electrode or attachment, though these are the major disadvantage when testing subjects with necrosis and infection. To solve this problem, we developed a new system for the non-contact measurement of sensory function by stimulating the skin surface with two kinds of air jet; steady flow and pulsatile flow. The perception threshold is calculated from the pulsatile dynamic pressure [Pa] and the magnitude of steady flow [mL/s].

This study was performed on 24 volunteer subjects. The perception thresholds for the steady flow and the dynamic pressure were  $51 \pm 20$  mL/s and  $285 \pm 282$  Pa, respectively, in the right forearm. The new device is effective for assessing peripheral nerve function although some improving points are still remained. More subjects with a wide age range may be required for the accurate evaluating the standard function.

研究分野：生体計測

キーワード：知覚閾値 非接触 神経障害 空気噴流

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 糖尿病性ニューロパチーは糖尿病の合併症の中で最も早期に現れるため、ニューロパチーの早期診断は疾病の進行や予防につながると考えられている。しかし、その診断法は神経伝導検査、アキレス腱反射、振動覚をはじめ数種の検査結果から総合的に判別している。

(2) 研究代表者らは健常群および糖尿病群を対象に電気刺激に対する神経線維の知覚感度(電流知覚閾値; Current Perception Threshold)を計測し、CPTは末梢神経障害に対して簡便なスクリーニング検査となり得ることを報告している。

(3) 末梢神経障害に対する大部分の検査は測定部へ電極や刺激用器具を密に接触させる必要があり、損傷や感染症などの患部に対して直接的な接触を避けられない等の欠点がある。また、末梢神経伝導検査では負荷刺激により疼痛を伴うことであり、患者の負担が大きい。

研究代表者らはこのような問題点を改善する目的で非接触的手法による新たな知覚閾値評価法を考案した。

## 2. 研究の目的

従来、末梢神経障害に対する定量的評価法の多くは測定部へ電極や測定用器具を密に接触させる必要があった。本研究は2種類の空気噴流(定常流およびパルス流)を利用して非接触による末梢神経機能の客観的評価法を考案した。本法は対象部を空気噴流で圧刺激し、測定部に直接触れることなく、噴流刺激に対する知覚閾値を定量的に評価する方法である。

これに基づいて、本研究では計測・評価システムの開発および基礎データ収集を行い、得られた知見から本法の有用性と実用性を検証する。考案した非接触による評価法を確立することで、これまでに測定困難であった部分での計測や評価が可能となり、またディスプレイ電極などのランニングコストの削減も実現できると考えている。

## 3. 研究の方法

(1) 2種類の空気噴流刺激による知覚閾値評価方法および測定システムの作製

### 測定システム

本システムの刺激用空気噴流は、利便性を考慮してエアーコンプレッサ(八重崎空圧株式会社製、YC-3RS)で充填される圧縮空気を、一度、精密減圧弁(SMC社製、IR1000-01)を介して約0.1 MPaに減圧した後、空圧タンクに充填した。定常流は空圧タンクより熱線式流量計(TSI社製、4100 Series)を介してノズル先端部から皮膚体表面に吹き付けた。一方、パルス噴流は調圧された空圧タンクから

の圧縮空気をデジタル電空レギュレーター(CKD社製、EVD-1100-108AN-C1B1-3)と2ポート高速電磁弁(KOGANEI社製、K2-100HF-09-LL)を組み合わせて供給した。パルス流は周波数; 約1 Hz、幅; 約0.5秒、デューティー比; 約30%で噴出され、1パルス流あたりの変化量は約150~200 Paとした。試作システムはノズル直前に圧力センサ(コパル社製、PA-20-302R-M)を備え、漸増するパルス噴流の圧力変化を連続的に測定して知覚閾値の算出に利用した。実際の生体計測では皮膚面で感知される圧力値を直接計測できないので、本法ではノズル内部の圧力値を計測し、これを用いて刺激により皮膚面で感知される圧力(推定動圧)を算出した。

### 噴出口(ノズル)の構造

空気流の噴出口(ノズル)は全長43 mm、直径15 mmの円柱アクリル材で試作した。その中央部には全長70 mm、外径2 mmのステンレスパイプ(内径1 mm)を通し、このパイプからパルス流を噴出した。一方、パイプを囲むように直径1 mmの穴を8つ設け、ここから定常流を噴出した。

(2) 試作した評価システムの基礎的特性の計測について

### パルス噴流の圧力分布に関して

本法は、皮膚面から一定間隔離れた位置にノズル先端を設置し、その距離をある程度維持した状態で定常流およびパルス流による刺激を行う。空気流はノズル先端より拡がりながら噴出されるので、皮膚面接触時の知覚誘発に必要な刺激の大きさは、ノズル先端と皮膚面の距離に依存することになる。したがって、開発した測定システムでは、ノズル先端と皮膚面の距離、およびノズル径に依存する皮膚面での圧力分布を詳細に把握する必要がある。実験に際して、XYZ軸方向へ精密に移動可能なステージに校正用の圧力センサ(コパル社製、PA-20-302R-U)を取付け、パルス噴流を徐々に増大し、測定開始20秒後の噴流における受圧面圧を計測した。得られた圧力値より、空気噴流の刺激に対する吹き付け距離(垂直方向: 1~15 mm)と空気流の拡散に対する圧力分布(水平方向: 0~10 mm)の関係性を解析した。

### 空気噴流の冷却効果について

本法の刺激用空気噴流は約20℃と皮膚温より低く、刺激時に触圧覚以外の冷覚も誘発される可能性がある。そのため、負荷刺激に対する体表面の温度変化に関してサーモグラフィ(FLIR社、i3)を用いて皮膚面に及ぼす冷却の程度を確認した。

(3) 本システムによる健常群の知覚閾値データの集積および解析

### 測定原理(知覚閾値の算出方法)

本法は対象部の皮膚体表面へ連続的な空

気流（定常流）を増大させながら吹き付け、定常流に対する最小感知を誘発させる。その状態で新たに漸増するパルス噴流で刺激すると、被験者は定常流を知覚する領域の中にパルス状に重畳された空気噴流を知覚する。本法では異なる2種類の空気噴流（定常流およびパルス流）で刺激して分離識別可能となった時点の定常流の流量 [ mL/s ] とパルス噴流の推定動圧 [ Pa ] より空気噴流に対する知覚閾値を算出する。実際の測定では皮膚面で感知される圧力値を直接計測できないので、本法ではノズル内部の圧力値を計測し、この値を用いて刺激時に皮膚面で感知される圧力（推定動圧）を算出する。

#### 生体計測における被験者群と測定手順

被験者には本研究の目的および測定方法に関するインフォームド・コンセントを行い、書面にて同意を得た20代ボランティア学生24名（男性15名、女性9名）を対象とした。測定部位は左右の前腕内側部と中指先端部の4カ所で、前腕内側部は肘窩の midpoint より60 mm 手掌側に進んだ位置、中指先端部は先端部と第一関節の中間点の位置にノズルを配置した。なお、本研究は杏林大学倫理委員会の承諾（承認番号：27-5）を事前に得てから実施した。

被験者には外部雑音（音、光など）の影響を抑制するために、アイマスク、ヘッドフォンを装着させた。その後、片側の腕を固定台に乗せ、測定対象部の位置をノズル先端から約10 mm に調節し、他方の手にはストップスイッチを持たせ、定常流とパルス噴流を分離識別できた時点でスイッチを押すよう指示した。測定開始前に2種類の空気噴流を別々に皮膚面へ吹き付け、被験者にそれぞれの空気噴流を確認させて閾値評価を開始した。実際の生体計測では、まず定常流の流量を徐々に増加しながら測定部を刺激し、空気流を感知した時点の流量 [ mL/s ] を定常流知覚レベルとして評価した。この状態のまま漸増するパルス噴流を重畳させて、新たに誘発されたパルス噴流について分離識別可能となった時点の圧力値 [ Pa ] を測定した。本研究では対象部ごとに3回ずつ繰り返し、再現性の確認された2つの測定値の平均値を採用した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 開発した評価システムの有用性と今後の改善について

24名を対象に測定システムによる生体計測を実施した。一定レベルの定常流を知覚した状態で、被験者は新たに加えたパルス噴流の微弱な圧力変化を識別可能であり、本法の閾値判別の実用性が明らかとなった。しかし、測定システムを用いて得られた知覚閾値には個人差が大きく、流量と推定動圧との良好な相関性は認められなかった。

測定システムのパルス噴流はデジタル電空レギュレータと2ポート高速電磁弁を用い

て構築した。両機器は動作時に駆動音や点滅ランプを発することで駆動状態を示すため、本研究ではこれらの対策として被験者に外部雑音消去機能を持つヘッドフォンとアイマスクを装着して測定を行った。光刺激は完全に遮光可能であったが、音刺激についてはわずかな駆動音が確認でき、完全に消失した測定環境には至らなかった。予備実験の段階で、音や光による感覚刺激が外部雑音となり、閾値の判別に影響を示すことが明らかであり、今後は駆動音を遮音できるようにシステムの改良が必要不可欠と考えている。

開発した本システムは、測定後に得られたパルス波形を処理して推定動圧を算出した。そのため、測定データをリアルタイムに確認することができないので、測定中に発生した人為的なミスを判断できない。本研究では生体計測に際して測定値の再現性を確認する目的で3回の繰り返しを行った結果、知覚閾値はほぼ一致したケースも認められたが、他の2回と比べて大きな差を持つ測定値も存在した。その要因として空気噴流の冷却効果による影響や音や光刺激の外部雑音が挙げられる一方で、前述したような人為的な測定ミスの可能性を考えられる。したがって、今後は測定時にリアルタイムに閾値の算出が可能なシステムへ改良し、単純なミス測定時に判別できるように対策する必要がある。

##### (2) 評価システムの基礎的特性について

###### パルス噴流の圧力分布に関して

図1はパルス噴流の吹き付け距離（垂直方向）と圧力分布の結果である。駆出開始20秒後におけるノズル直下の受圧面圧は、ノズル先端から垂直方向1 mm および4 mm ~ 11 mm までの範囲は約600 Pa であった。一方、ノズル先端から受圧面までの距離が2 ~ 3 mm および12 ~ 15 mm ではピーク値が約450 ~ 530 Pa とおおよそ100 Pa 低下した。

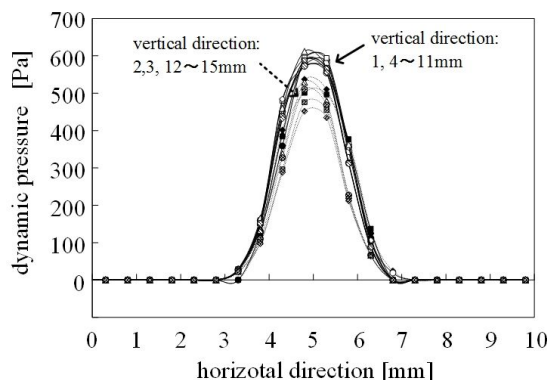


図1 ノズル先端部からのパルス噴流に対する圧力分布

生体計測に際して、皮膚面で感知される受圧面圧は測定できない。このため、本システムではノズル直前に圧力センサを設置して、この測定値を代用した。実験結果からノズル直前の圧力値は、図1で示した受圧面圧と比べて約1.39倍であったので、この関係を利用

して本法では推定動圧を算出して評価した。

#### 空気噴流の冷却効果について

図2は噴流刺激に対する皮膚体表面の温度変化をサーモグラフィで測定した画像である。ノズル内部は圧縮空気で満たされるため27℃以下であった。一方、皮膚体表面の非刺激部は32~33℃であったのに対し、刺激部では空気噴流の冷却効果によって30℃近くまで低下したことが明らかとなった。

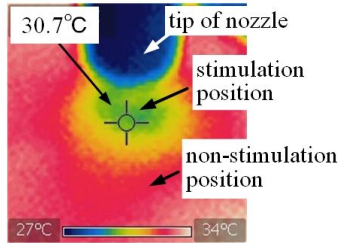


図2 噴流刺激による皮膚体表面の温度変化

文献によると、触覚と冷覚を同時刺激した際、触覚に対する知覚応答は冷覚に影響を受けないことが報告されている。したがって、本法の空気噴流による冷覚誘発が目的とする知覚閾値に影響しないと推定することは可能である。一方で、測定終了後の被験者からの意見聴取では冷覚との関係性を述べた者もあり、噴流の温度の影響を完全に否定することはできないと考えている。

#### (3) 健常群の閾値データの集積および解析

図3は24名の学生ボランティアを対象に実施した閾値計測について定常流の流量[mL/s]とパルス噴流の推定動圧[Pa]を示した結果である。4つの部位別にまとめたところ、測定データは流量100 mL/s、推定動圧800 Paの範囲内に大部分が収束した(グレー部分)。しかし、測定部位ごとの流量と推定動圧の関係について、ピアソンの積率相関係数を算出したところ、4カ所とも有意ではなかった(右前腕部:  $r = 0.12, n.s.$ , 右中指先端部:  $r = -0.21, n.s.$ , 左前腕部:  $r = -0.17, n.s.$ , 左中指先端部:  $r = 0.23, n.s.$ )

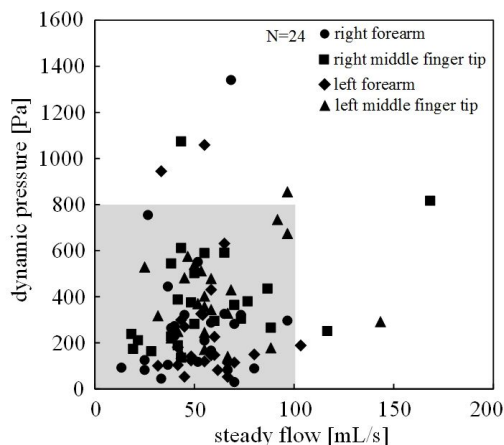
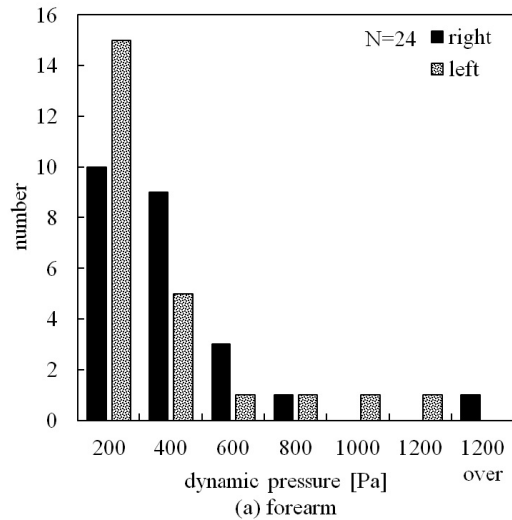
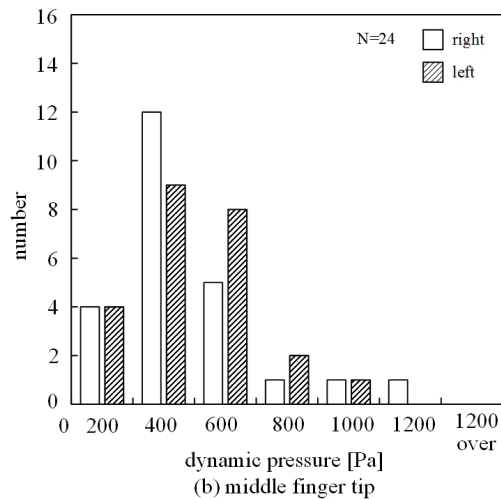


図3 空気噴流に対する流量と動圧の知覚閾値

次に、異なる2種類の空気噴流を判別した際に得られた推定動圧を分析してヒストグラムとして図4に示した。同図から明らかのように、前腕内側部は200 Pa前後で2種類の空気噴流を分離識別した被験者が最も多く存在した(図4(a)参照)。一方、中指先端部は200 Paで判別した被験者は左右ともに少なく、大部分の被験者は400~600 Pa前後に収束した(図4(b)参照)。



(a) forearm



(b) middle finger tip

図4 パルス噴流の知覚閾値(推定動圧)のヒストグラム (a)前腕内側部、(b)中指先端部

さらに、得られた測定データを詳細に分析すると、定常流の流量(平均値)は測定対象部による明確な違いはなく、およそ53 mL/sであった。一方、パルス噴流の推定動圧(平均値)は前腕内側部で約219 Pa (2.2 gf/cm<sup>2</sup>)、中指先端部で約365 Pa (3.7 gf/cm<sup>2</sup>)となった。両部位の推定動圧をStudent's t-testで比較した結果、有意な差が認められた( $t = 4.29, P < 0.01$ )。この結果は、前腕内側部に比べて指先の空気噴流に対する感受性が鈍いことを意味するが、データ群のばらつきが大きいことなどから更なるデータの収集および分析が必要と考えている。

今回、得られた測定データは年齢を限定したものであり、一般的な意味における健常群の基準域を定義するには測定データ数が不十分であった。今後は、試作システム、測定環境および手技の改善に努め、臨床応用を目指して更なる健常群のデータを集積する必要がある。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

瀬野 晋一郎、木暮 英輝、渡辺 篤志、加藤 幸子、小林 博子、嶋津 秀昭、非接触体表圧刺激による知覚閾値評価システムの開発および評価、生体医工学、査読有、53巻6号、2015、303 - 310  
DOI:10.11239/jsmbe.53.303

[学会発表](計2件)

瀬野 晋一郎(代表)、非接触体表圧刺激による知覚閾値評価システムの開発、第53回日本生体医工学会大会、2014年6月26日(木)、仙台国際センター(宮城県・仙台市)

瀬野 晋一郎(代表)、非接触体表圧刺激による知覚閾値評価システムの開発および評価、生体医工学シンポジウム2015、2015年9月25日(金)、岡山国際交流センター(岡山県・岡山市)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

瀬野 晋一郎 (SENO, Shin-ichiro)

杏林大学・保健学部・講師

研究者番号： 70439199