

# 感覚検査における深部感覚検査用刺激発生技術の研究

## — 定量的振動覚検査装置の開発 —

永田正伸<sup>1,\*</sup> 小山善文<sup>2</sup>

A Study of Technology for Generating Stimulus using Deep Sensation Tests in Sensory Testing

- Development of a Device for Quantitative Vibratory Sensation Tests -

Masanobu Nagata<sup>1,\*</sup>, Yoshifumi Oyama<sup>2</sup>

In this paper, the development of a device for quantitative vibratory sensation tests in medical treatment or rehabilitation fields is proposed. Recently, it has been speculated that the number of patients who have sensation disorders will increase with the aging of Japanese population. A sensation test is one good way to diagnose or to confirm the progression of the disease. Our final goals are to establish technologies to generate stimuli for sensation tests, using not only vibratory, but also temperature, tactual and pressure sensation so as to develop a small, light device for quantitative sensation testing which combines these multiple technologies.

キーワード：感覚検査、振動覚、振動発生器、定量検査

Keywords：Sensation Test, Vibratory Sensation, Vibratory Generator, Quantitative Testing

### 1. 緒言

脳血管障害や糖尿病、脊椎障害など、感覚障害を伴う疾患患者数は、社会の高齢化に伴い今後益々増加する可能性が高い。これらの感覚障害を伴う疾病に対しては、臨床場面での感覚検査を有効に活用し、診断や治療の進捗度合いを確認することが重要となる。

筆者らは、表在感覚である触・圧覚と温度覚、および深部感覚である振動覚に着目し、これらの複数の感覚に対して1つの機器で検査可能な複合型感覚検査装置の開発を最終的な目的として研究を続けて来ている<sup>(1)-(3)</sup>。定量的感覚検査装置については、これまでにいくつかの装置が提案されており、振動覚検査装置についてもVibration II (Sensortek社)、TM-31A(メディックインターナショナル社)、SMV-5(テクノログ社)などが開発され、その有用性も示されている<sup>(4)</sup>。しかし、これまで提案されている装置は単独の感覚検査用であり、複数の感覚検

査を統合した装置は筆者の調査範囲では見当たらない。筆者らは、温度覚、触・圧覚などの感覚検査についても、検査装置の開発を進めており<sup>(1)</sup>、今後、これらの装置を総合し、最終的に複合型感覚検査装置の開発を目指している。本稿では、深部感覚である振動覚検査に対する振動覚刺激装置の研究・開発について報告する。

### 2. 医療現場における感覚検査

#### 2.1 感覚検査

ヒトの感覚は、味覚、嗅覚、視覚、聴覚などの特殊感覚と、触覚、痛覚、温度覚、振動覚、運動覚などの体性感覚および内臓感覚に大別されるが、医療現場(臨床医学)では、主に体性感覚が扱われている。体性感覚は、さらに、皮膚あるいは粘膜上で生じる表在感覚と、骨膜、筋肉、関節などで生じる深部感覚に分類され、触覚、痛覚、温度覚などは表在感覚、振動覚、運動覚は深部感覚となる。医療現場においては、これらの各体性感覚に対して、病状の診断や回復度合いおよび治療効果<sup>(5)</sup>の確認などを目的として、感覚検査が実施されている。例えば、触覚検査では、患者が閉眼した状態で、柔らかな毛筆や脱脂綿、鳥の羽などを用い、検査部位に軽く触れ患者が触覚を感じた場合に“はい”と答えさせる。また、温度覚では、温水(40~45℃)と冷水(5~10℃)を試験管などに入れて数秒

<sup>1</sup> 制御情報システム工学科  
〒861-1102 熊本県合志市須屋 2659-2  
Dept. of Control and Information Systems Engineering,  
2659-2 Suya, Koshi-shi, Kumamoto, Japan 861-1102

<sup>2</sup> 人間情報システム工学科  
〒861-1102 熊本県合志市須屋 2659-2  
Dept. of Human Oriented Information Systems Engineering,  
2659-2 Suya, Koshi-shi, Kumamoto, Japan 861-1102

\* Corresponding author:  
E-mail address: nagata-m@kumamoto-nct.ac.jp (M. Nagata).



Fig.1 Measuring acceleration by 128Hz tuning fork.

Table 1 Specifications of 3D acceleration sensor and oscilloscope.

3D acc-sensor : Crossbow CXL10HF3	
Sensitivity	±0.1V/G[G-forces]
Bandwidth	0.3-10000Hz
Noise	0.3mG rms
Oscilloscope : KEYENCE NR2000	
Sensitivity	14bit
Range	±5V
Sampling Time	10KHz

間検査部位にあて暖かいか冷たいかを答えさせる。なお、これらの検査では検査部位と体の左右対称となる部位(一般に感覚が正常な部位)にも行い、左右での感覚の程度の違いが比較される。

## 2.2 振動覚検査の現状と問題点

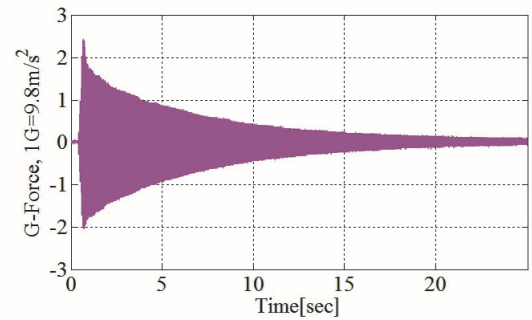
振動覚検査においては、128Hz または 256Hz の周波数で振動する音叉が用いられる。検査者は、まず、自身の手や大腿部で音叉を叩いて振動を発生させ(以下、“打振”と表記)、即座に患者の軟部組織の少ない骨の部分に振動する音叉をあて、振動を感じなくなったら“はい”と答えさせ、音叉をあててから感じなくなるまでの時間を調べる。音叉では、振動が指数減衰的に小さくなるため、小さな振動を感じることが出来るに従ってこの反応時間は長くなる。他の感覚と同様に、左右対称となる正常部位と比較し、時間の長・短によって症状やその回復の程度を判断する。

このように、振動覚検査では音叉を検査者が打振して使用するため、検査者の体格や性別などによって検査開始時の振動の大きさが違うことが容易に想像される。また、1人の検査者であっても打振の度合いが常に一定であるとは限らず、従って、上記のように振動を感じる大きさを音叉の減衰時間で測る方法では、必然的にある程度の誤差が含まれることとなる。

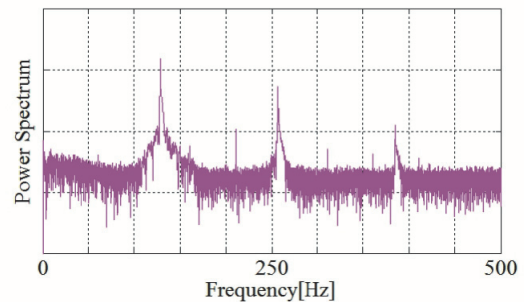
## 3. 振動の発生

### 3.1 音叉による振動

振動覚検査に用いる検査装置としては、少なくとも現在の検査で用いられている音叉の振動と同等の強さの振動を発生する必要がある。そこで、現在の検査で音叉が発生する振動の強さを計測した。まず、音叉による振動



(a) Acceleration.



(b) Frequency (FFT analysis).

Fig.2 Sensing results of vibration by 128Hz turning

の強さを計測する上で、強さの指標として振動の力と振動の振幅の大きさの2種類が考えられる。振動の力は、振動の加速度と振動している物体の質量の積となるから、加速度を測定できれば計算することが可能である。一方、加速度は振幅の2階微分であるから、結局、振動の加速度を測定することで、振動の強さを表すことが可能である。また、振動覚の受容器であるパチニ小体は、加速度に対する受容器であることから、今研究では、音叉の振動の強さを加速度で表すこととし、音叉が発生する加速度を、3D 加速度センサを用いて計測した。

Fig.1 に 3D 加速度センサを用いた音叉の振動による加速度の計測の様子を示す。計測は、3D 加速度センサをスポンジ上に置き、センサ上部に打振した音叉を軽く持ってあてて行った。計測に用いた 3D 加速度センサおよび計測器の諸元を Table 1 に示す。また、センサと音叉間の接触時の衝撃を緩和するために、センサ上部に薄く切った衝撃吸収用ゲルを置いて対応した。なお、後述の試作した振動覚検査装置の加速度計測に置いても全く同様に行った。上述のように、打振は個人によっても初期に発生する振動の度合いが異なるため、計 10 回の計測を行い、これらの値を比較した。それらの計測結果の 1 つを Fig.2 に示す。なお、図中の加速度値は鉛直方向成分であり、重力加速度値  $9.8\text{m/s}^2$  を 1G として表記している。また、今回用いた Crossbow 社製 CXL10HF3 の 3D 加速度センサと KEYENCE 社製オシロスコープ NR2000 による加速度の計測精度は、Table 1 より 0.01G 程度と計算される。

開発する検査装置で発生すべき振動の最大加速度は、音叉が発生する最大加速度程度が要求される。従って、上で計測した 10 回のデータから得られる最大加速度がその目安となる。また、発生すべき最小加速度は、健常者が振動を感じなくなる時点の加速度以下である。そこで、複数の健常者に対し、先に示した音叉による振動覚検査方法で検査を行い、そのうちの最大時間を求めた。さらに、求めた時間を上の 10 回の加速度データのうち加速度の最大値がもっと小さいデータに適用し、その時点の加速度値を求めた。その結果、最大加速度は 1.98G、最小加速度は 0.13G であった。なお、最大加速度については、計測開始時の衝撃によるものと思われる数値については無視し、指数減衰曲線より最大値を推定して求めている。従って、開発する振動覚検査装置が発生すべき加速度の目安としては、最大 1.98G 程度および最小 0.13G 以下となる。

### 3.2 振動発生素子の検討

振動を発生する素子としてはいくつか考えられるが、装置の小型化が可能であること、周波数の指定が可能であることなどの条件から次の 3 つの素子について可能性を検討した。

#### 3.2.1 圧電素子による振動の発生

圧電(ピエゾ)素子は、電圧を加えると変形が生じ、逆に変形や力が印加されると発電するピエゾ効果を持つ素子で、小型で安価であることから、超音波洗浄装置や圧電ブザー、ライターやコンロの着火源など身近に用いられている。単板形、バイモルフ形、積層形の 3 種類があり、それぞれ変形量や変形方向が異なっている。また、実際に市販されている大型の振動覚検査装置では、振動発生用アクチュエータとして圧電素子を使用している<sup>(6)</sup>。しかし、一般にアクチュエータとして使用するには、比較的大きな電圧が必要であり、また、振動周波数が形状に大きく依存するため詳細な設計が必要となることから、今回の試作装置としては採用が困難であった。近年、スマートフォンやタブレットの振動による操作提示用に小型の圧電素子と制御ドライバ IC が使用されており、将来的には本装置への採用の可能性もあると考えられる。

#### 3.2.2 振動モータによる振動の発生

振動モータは、携帯電話のマナーモード時の振動を発生するアクチュエータとして非常に身近である。小型軽量で、かつ省電力である。振動モータの振動発生原理は、偏芯した負荷をモータ回転軸に取り付け、これを回転させることで偏芯重心が回転し加速度変動により振動が発生する。従って、振動の周波数は原理的に回転数に依存している。すなわち、周波数一定で振動の強さ(加速度)を変えるには、負荷の偏芯量を変更する必要があり、周波数一定での連続的な強さの変更が不可能である。一方、振動の強さを連続的に変更するためには、周波数を変え

る必要がある。ヒトが感じることのできる振動の周波数と強さの関係は、一定の周波数以下では、感じる最小の強さはほぼ一定であることが示されている<sup>(7)</sup>。従って、偏芯モータによる振動を用いた振動覚検査も可能であると考えられるが、現在の周波数一定下での検査と検査方法が大きく異なることになるため、本研究では不採用とした。

#### 3.2.3 電磁コイルによる振動の発生

電磁コイルは、ソレノイドとして種々の装置や自動車など幅広く使用されているアクチュエータの動力源となっているもので、一般的には振動発生用としては用いられていないが、最近では、電動歯ブラシの振動発生用アクチュエータとしても用いられている。駆動力の発生原理としては、電磁コイルに電流を通電することにより生じる磁界により、磁性体を吸引する吸引力を利用している。通常、ソレノイドアクチュエータでは、電磁コイル単体では吸引力または反発力のみであるため、復元力として弾性体を利用している。一方、電磁コイルを複数用い、永久磁石の吸着力と組み合わせることで、複雑な動作を可能としたものもある。このようなソレノイドアクチュエータの駆動原理を応用して、適当な弾性構造を与えて一定周波数の電流を印加すれば、振動覚検査に必要な振動の周波数と強さを発生することが可能であると考え、本研究では、開発する振動覚検査装置のための振動発生素子として、電磁コイルを用いることとした。

## 4. 振動覚刺激用振動発生機構

### 4.1 パネを用いた振動発生機構

前章で示したように、電磁コイルを用いた振動発生機構を検討した。まず、振動を発生するための弾性構造として、電磁コイルによって吸引する可動鉄芯をパネによって支持し、可動鉄芯への吸引力とその解放により振動を発生する機構とした。その構造を Fig.3 に示す。Fig.3(a) に示すようにコイルへの通電時は、吸引力により可動鉄芯が吸引され片方のパネが縮み一方のパネが伸ばされる。また、コイルへの通電を止めると、Fig.3(b)のように

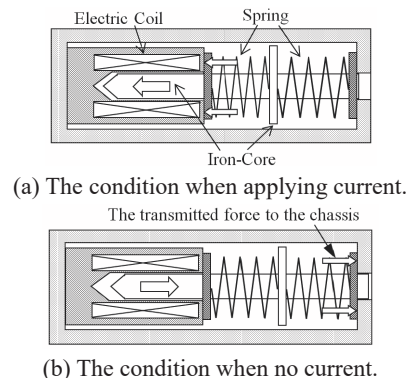
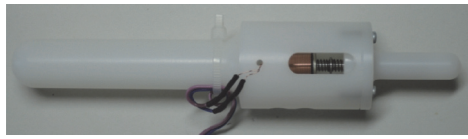
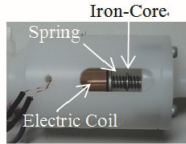


Fig.3 Generating vibration structure by using an electric coil.



(a) The external appearance.



(b) The appearance of electric coil and elastic structure at the iron-core.

Fig.4 Prototype 1 of the vibration generator by using an electric coil.

吸引力が無くなり伸縮したバネの復元力によりもとに戻ろうとする。この動作を指定の周波数で行えば、所望の振動が得られる。また、振動の強さについては、吸引力の大きさを変えることによって可動鉄芯の振幅を変化させ、すなわち、振動の加速度を変えることができる。吸引力の大きさは、電磁コイルに通電する電流の大きさに応じて変化するため、印加する電流の大きさを変えることで吸引力を変化させることが可能であるが、電流の大きさを変化させる回路は複雑となるため、実際には、一定周期で電磁コイルに印加する PWM 電流のパルス幅を変化させることで対応した。すなわち、パルス幅が変化すると、電磁コイルに生じる吸引力が可動鉄芯に働く時間が変化し、その分、可動鉄芯の移動量が変化する。この移動量の変化により、加速度も変化するようになり、振動の強さを変化させることができる。なお、Fig.3(a),(b) に示すように、可動鉄芯の振動はバネを介して筐体に伝わり、振動発生機構全体が振動する。

このようにして検討した電磁コイルによる振動発生機構を用いた振動発生器を試作した。試作した振動発生器を Fig.4 に示す。本試作器の振動発生状況を Fig.1 と同様の方法で計測したところ、振動の周波数および振動の強さ(加速度)についてはある程度所望の結果が得られたが、弾性体として金属製のバネを用いたため、同じく金属製の可動鉄芯との接触により比較的大きな振動音が生じた。感覚検査は、比較的静かな環境で行われるため、振動と同期した振動音は検査に影響を与えることが容易に予想される。この振動音を、ピーズ社製デジタルサウンドレベルメーターGS-04 を用いて振動発生器から 0.3m の位置で計測したところ、60dB 程度の騒音レベルを示した。一般に、病院における室内の騒音レベルは、診察室および検査室での許容騒音を 40~45dB としており<sup>(8)</sup>、60dB はかなり高い騒音レベルであるといえる。

#### 4.2 衝撃緩衝材を用いた振動発生機構

前節で試作した振動発生機構の騒音レベル低減のため

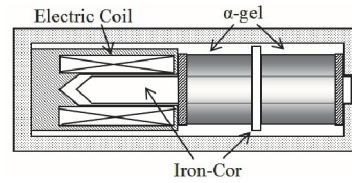
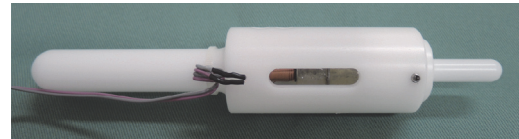
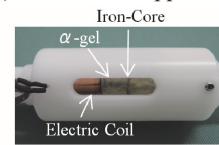


Fig.5 Generating vibration structure by using an electric coil with  $\alpha$ -gel.



(a) The external appearance.



(b) The appearance of electric coil and elastic structure at the iron-core with  $\alpha$ -gel.

Fig.6 Appearance of Prototype 2.

に、弾性体に衝撃緩衝材( $\alpha$ ゲル)を用いて新たに試作した(以下、“試作 2 号器”、前節の試作器を“試作 1 号器”と表記)。すなわち、Fig.3 の 2 つの Spring 部分に  $\alpha$ ゲルを用いることにより、弾性体と可動鉄芯との接触音を小さくする効果が期待できる。Fig.5 に試作 2 号器の振動発生機構を、また、Fig.6 に製作した試作 2 号器を示す。試作 1 号器と同様の測定状況で試作 2 号器の振動音を計測したところ、騒音レベルは 45dB 程度まで改善された。

## 5. 振動覚検査装置の試作

### 5.1 試作装置仕様

4.2 で示した試作 2 号器を用いて、実際に医療現場で検査を実施するための制御装置を含めた振動覚検査装置を製作した。この装置の諸元と機能および外観をそれぞれ Table 2, Fig.7 に示す。振動発生器への電流制御を行うコントローラには H8-3664F マイコンを用い、同マイコンの PWM 信号生成機能を利用して 128Hz の電流パルス信号を電磁コイルへ印加し振動を発生させる。振動のパターン(Mode)には、加速度ゼロから線形状に増加する Ramp + Mode、同様に最大値からゼロまで線形状に減少する Ramp - Mode の 2 つのパターンを用意した。本試作装置を用いた振動覚検査では、まず、検査者は振動発生器の棒状の端部を被験者の患部に当てた状態で、Control Box 上の Control Switch を押す。Control Switch を押すと 2 秒後に振動が始まり、同時に振動開始からの経過時間が LCD に表示され、設定 Mode に従って振動が増減する。被験者は、振動を感じた時点もしくは感じなくなった時

Table 2 Specifications of the developed testing device.

Control BOX	
CPU	H8-3664F
Output Mode	liner increase : Ramp + Mode liner decrease : Ramp - Mode Constant : Const Mode
Display Function on LCD	Elapsed time from power ON Elapsed time from start to end of testing Max,Min value for vibration force Control Mode
Function of Control Switches	Blue : Start and Stop vibration Yellow : Mode select Green : Select max value of vibration forces Push Button : Patients push when they become insensitive to vibration
Oscilloscope : KEYENCE NR2000	
Sensitivity	14bit
Range	±5V
Sampling Time	10KHz

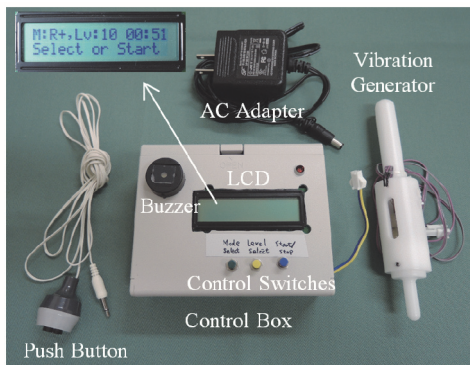
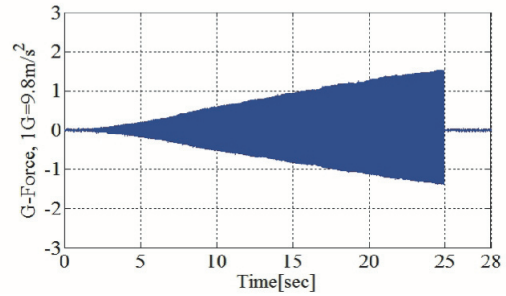


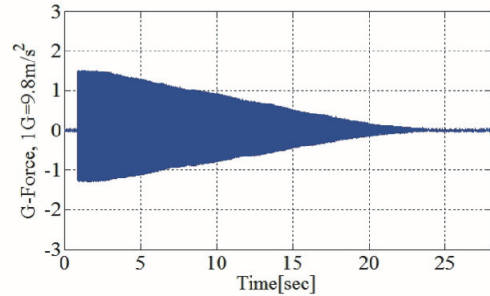
Fig.7 Appearance of the developed device for quantitative vibratory sensation testing.

点で手に持った Push Button を押す。Push Button が押されると振動が止まり、同時に LCD の経過時間表示が停止する。すなわち、この時 LCD に表示された経過時間が、本装置を用いた振動覚検査における反応時間であり、検査者はこれを記録する。ここで、音叉による振動覚検査では、Fig.2(a)のように指数減衰的に加速度が減少する振動を用いて検査されるが、本装置のように振動発生器による振動検査では、音叉とは逆に加速度が増加する振動を発生させることができる。さらに、音叉と同様に指数減衰的な加速度変化を発生することも可能である。臨床時において、どのような振動パターンが有効であるかは、今後、実際の現場において検証すべき課題である。

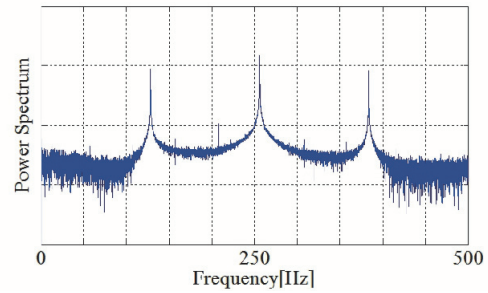
なお、試作 2 号器での振動発生時の振動音については、前述のように騒音レベルが 45dB 程度まで低減されたが、実際に医療現場で検査試験を実施したところ、検査への影響が懸念される程度の騒音レベルであったため、Control Box に圧電ブザーを取り付け、ブザー音による振動音のマスキングによって対応することとした。



(a) Ramp + Mode.



(b) Ramp - Mode.



(c) Frequency (FFT analysis) of (a).

Fig.8 Sensing results of the vibration by the developed device.

## 5.2 試作装置による振動

本装置を用いて、Ramp + Mode および Ramp - Mode で発生させた振動の加速度について、Fig.1 の音叉の場合と同様に 3D 加速度センサを用いて計測した結果を Fig.8 に示す。同図(a),(b)に示すように、ほぼ音叉と同程度の大きさの加速度を発生できていることが分かる。一方、Fig.8(c)に示すように、FFT による加速度の周波数解析では、生成される振動の加速度において、128Hz の周波数成分のパワーに対して、128Hz の通倍周波数成分である 256Hz の周波数成分のパワーが大きくなっており、また、384Hz 成分のパワーも比較的大きくなっている。これは、振動発生機構の弾性構造に高周波モードが含まれているためであると考えられるが、この高周波成分の影響については、今後臨床試験による検証が必要である。

## 5.3 音叉および試作装置による振動覚検査の比較

本試作装置を用いて、健常者 5 名に対し従来の音叉による検査と本装置による検査を同時に行い、両者を比較した。検査は、被験者毎に左右(L,R)手首の尺骨茎状突起

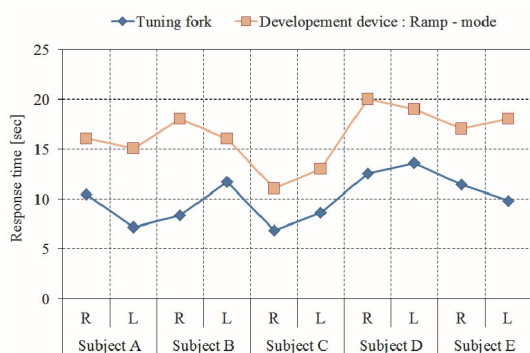


Fig.9 Comparison with a tuning fork and the development device on vibratory testing.

部に対し、従来の音叉を用いた場合および試作装置による Ramp - mode を用いた場合について実施した。実施結果を Fig.9 に示す。音叉および Ramp - mode では振動が徐々に減衰するため、被験者の反応時間が長いほど小さい振動を感じていることになる。すなわち、音叉と本装置での被験者毎の反応時間の傾向が同様となれば、本装置が振動覚検査用として有用であると判断できる。Fig.9 により、被験者毎の反応時間が、ある程度同様の傾向となる結果が得られており、本装置の有用性が示されている。なお、Fig.9 において、音叉と本装置での反応時間が一致していないのは、音叉では、Fig.2(a)に示すように指数減衰的に振動の強さが小さくなるのに対して、試作した装置では、Fig.8(b)に示すようにランプ状に減少するため、時間経過に対する振動の強さが異なるためである。より厳密な評価実験については、今後継続して実施する必要がある。

## 6. 結言

本稿では、深部感覚である振動覚検査において、電磁コイルを用いた振動発生機構とその制御方式を提案し、提案した機構を用いた振動覚検査装置の開発について述べた。試作した装置により、現在、振動覚検査で一般的に用いられている音叉とほぼ同等の振動が得られ、さらに健常者に対する検査試験により振動覚検査に対する有用性を示した。試作した装置では、振動の発生を電磁コイルに印加する電流を制御することで実現しており、原理的に検査者に依らずに常に定量的な振動を得ることができ、音叉を用いた振動覚検査に比べて、より定量的な評価が可能になると考えられる。

5.2 で示したように、試作した装置では、Ramp + mode により振動が徐々に大きくなる検査が可能である。従来の音叉による検査では、振動は原理的に小さくなるため、このような検査は実現できない。ヒトの感覚は刺激に順応する性質があるため、振動が徐々に小さくなる場合より、徐々に大きくなる刺激の方が、より厳密な検査が可

能であると考えられる。従って、試作した振動覚検査装置を用いることで、より厳密な振動覚検査が可能となることが期待できる。一方、同節で示したように、開発した振動発生器による振動では、音叉の振動に比べて 256Hz および 384Hz の高周波成分の振動をより多く含んでいる。これらの課題に対して、今後は実際に感覚障害のある患者に対し開発した装置を試用して結果の解析を行い、有用性の高い感覚検査装置の開発を進める所存である。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、専門的な立場からご助言頂いた熊本大学医学部附属病院リハビリテーション部特任准教授大串幹氏(当時)、作業療法士萩野光香氏に感謝致します。

(平成 30 年 9 月 25 日受付)

(平成 30 年 12 月 5 日受理)

## 参考文献

- (1) 大串,西,萩野,中村,水田,濱崎,小山,永田:「定量的感覚検査のための複合感覚提示器の開発:ペルチェ素子を用いた温度刺激プローブの特性評価」,日本整形外科学会雑誌,Vol.87,No.8,S1443(2013).
- (2) 小山,濱崎,永田:「感覚提示器における振動覚刺激プローブの特性評価」,電気関係学会九州支部連合大会講演論文集,Vol.65th,ROMBUNNO.07-1P-06(2012).
- (3) 東町,永田,内梨:「振動覚検査用小型振動発生機構の試作と特性評価」,精密工学会九州支部地方講演会講演論文集,Vol.2009,pp.107-108(2009).
- (4) 大西,八幡,山本,村井,池田:「3 つの機種 (Vibration II TM-31A SMV-5) による振動覚弁別閾値認識の比較」,産業医科大学雑誌,No.16,pp.61-70(1994).
- (5) 山内:「理学療法における感覚障害の評価,理学療法」,Vol.12,No.4,pp.271-280(1995).
- (6) 前田,宮下,吉川:「手腕振動障害検診のための指先振動感覚閾値測定装置の国内外の変遷」,安全と健康,Vol.5,No.2,pp.92-95(2014).
- (7) 鈴木,松岡:「新型振動覚計(SMV-5)の作成経緯(第2報)」,Therapeutic Research,Vol.12, No.12,pp.577-584(1991).
- (8) 日本建築学会編:「建築設計資料集成1 - 環境」,13,丸善(1978).