

# 安価な規準化脈波容積(normalized pulse volume)測定装置の設計

## Designing of the inexpensive device for measuring normalized pulse volume

さくら い ゆう た  
櫻 井 優 太

### 〈要 旨〉

生理心理学・精神生理学の研究で用いられる生理反応の測定機器は一般に高価であるため、手軽に用意することができない。そこで本稿では安価に製作可能な規準化脈波容積の測定回路を設計し、実際に製作した例を報告した。規準化脈波容積とは光電式指尖容積脈波の波形を、直流成分と、時定数1秒でハイパスフィルタを施して得られる交流成分とに分けて導出し、各脈動における交流成分の振幅電圧値を同一心周期の直流成分平均電圧値で除して求めた値である。反射タイプフォトリフレクタLBR-127HLD、2回路入りCMOSレールトゥレールオペアンプLMC6482、電圧コンバータLT1054を中心とする回路を設計し、ブレッドボードを用いて回路を製作した。単一基盤マイクロコンピュータArduinoのAD変換機能を用いてデータをサンプリングし、コンピュータ上に波形を描き出すシステムを構成することができた。Arduinoを含めて合計約四千円で測定装置を製作することができた。

### 〈キーワード〉

生理反応、規準化脈波容積、Arduino、測定装置の自作

## I. はじめに

### 1. 生理反応測定装置の自作

心理学の領域のひとつである生理心理学・精神生理学の研究においては、実験参加者の生理反応をとらえることによって、知覚、注意、記憶、運動、あるいは感情など種々の心理的活動について検討をおこなっている。生理反応の指標となるのは、脳波、脳血流などの中枢神経指標や、心電図、筋電図、脈波、呼吸、皮膚温度などの末梢神経、自律神経指標などである。特に感情やストレスに関する研究では、心電図などを測定することにより自律神経活動を評価し、検討が行われてきた。

しかし、このような生理反応をとらえる機器は一般的に高価であり、測定環境を整えるうえで1台あたり数百万円以上の費用がかかることが少なくない。このことは、精神生理学的な研究を行う障壁のひとつとなっている。そこでこれまでに、安価な単一基盤マイクロコンピュータであるArduino (Arduino Holding製)を用い、心電図、脈波、呼吸(鼻腔温度計測によるもの)、筋電図、皮膚コンダクタンスを測定する装置を製作してきた。それぞれの生理反応をとらえる電極やセンサーの信号を増幅する回路をArduinoに接続し、ArduinoをUSBコネクタで測定用コンピュータに接続、コンピュータ上で波形を確認しながら測定を行うことができるという構成である。Arduinoは約三千元、また各回路は市販の電子部品を組み合わせることによって、それぞれ数千円程度で組み立てることができた。これにより安価な実験・測定環境を構築できた。

特に皮膚コンダクタンスは独自に回路を設計し、虚偽検出(ウソ発見)実験に実用した例を報告した<sup>1)</sup>。皮膚コンダクタンスとは手指における電気の流れやすさを測定したものであり、感情やストレスなど心理的興奮により生じる発汗反応、いわゆる精神性発汗を鋭敏に反映する<sup>2)</sup>。メーカーによって設計・検品された市販の皮膚コンダクタンス測定装置に比べて測定精度はある程度劣ると考えられるが、心理学の実験研究、あるいは心理学授業科目として心理実験実習に十分用いることのできる装置を、Arduinoを含めて合計約四千元で製作することができた。

本稿では、安価に組み立てられるように設計した規準化脈波容積(normalized pulse volume; NPV)測定装置の回路と製作方法を報告する。

### 2. 脈波とは

脈波とは、センサーを用いて指先に伝わる心臓の拍動を測定したものである。測定にあたって実験参加者に対して身体的被害を与えること、すなわち侵襲性が低い測定法であり、これまで多くの心理学研究に用いられてきた。脈波には、血管にかかる圧力の変動を測定したもの(脈圧; pulse pressure)と、心臓の収縮により血管が押し広げられることによって生じる容積の変化を測定したもの(容積脈波; pulse volume)の2種類がある。光センサーによって測定されるのは容積脈波であり、指先で測定されることを含めて、光電式指先容積脈波(finger photo-plethysmogram)と呼

ばれている。

光電式指尖容積脈波の測定にあたっては、700～1200 nm程度の近赤外光が用いられる<sup>3)</sup>。この領域の光は皮膚をよく透過し生体内部に入る。この時、血液中のヘモグロビンは他の生体組織よりも近赤外光の吸収度が高いため、心臓の収縮により血液が送り出されて血管が拡張した瞬間と、心臓の拡張により血管が収縮した瞬間とでは、近赤外光の吸収量が変化する。

指先に近赤外光の照射装置(LED)を置き、その反対側に近赤外光をとらえるセンサー(フォトダイオード)を置くと、照射した近赤外光がヘモグロビンにより吸収されつつ指を透過して反対側に現れた量が測定され、心臓の拍動に伴う血管の容積変化を波形としてとらえることができる。あるいは、LEDと同じ側にフォトダイオードを置くことでも、ヘモグロビンにより吸収されつつ、指の組織内を散乱・反射した光量を測定することが可能である。この方法でも同様に、心臓の拍動に伴う血管の容積変化を波形としてとらえることができる。前者は透過型のセンサー、後者は反射型のセンサーと呼ばれる。

脈波からは脈拍数をとらえることができ、心電図によって得られる心拍数とほぼ同等の自律神経活動の指標となる。また、脈波の振れ幅(脈波高)を計測すると、精神的興奮やストレス時に波高が減少することがよく観察される。これは $\alpha$ アドレナリン作動性の交感神経興奮により、細動脈が収縮した結果として生じる現象である<sup>3)</sup>。脈波高は、脈波容積または血液容積脈ともよばれる。感情やストレスを研究するとき、交感神経活動をとらえる指標として脈波高が目される(図1)。

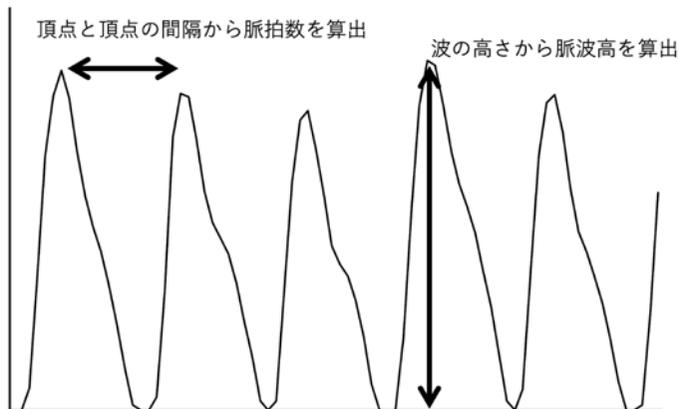


図1 脈波の波形例

### 3. 規準化脈波容積とは

規準化脈波容積(normalized pulse volume; NPV)は比較的新しい脈波の指標である。光電式指尖容積脈波によって得られる脈波高(脈波容積)は明瞭な単位を持たず、絶対量としての扱いができないため、相対的な変化としての評価しかできない。従って動脈血行動態の正確な把握、つまりは血管の収縮拡張に関わる交感神経系活動を正しく評価することは難しいという指摘があった<sup>4)</sup>。

そこで、光電式指尖容積脈波の波形を、直流(DC)成分と、時定数1秒でハイパスフィルタを施して得られる交流(AC)成分とに分けて導出し、各脈動におけるAC成分の振幅電圧値を同一心周期のDC成分平均電圧値で除した値を求めるといった方法が考案された<sup>5) 6) 7)</sup>。この値がNPVである。NPVは、脈波容積に現れてしまう様々な誤差要因(皮膚の厚みや皮膚の色、組織組成など)を相殺できることから、指尖部細動脈を支配する $\alpha$ アドレナリン作動性交感神経活動をより高い純度で反映すると考えられている<sup>4)</sup>。NPVは虚偽検出(ウソ発見)の指標としても注目されつつある<sup>4)</sup>。

なお「規準化」は「基準化」と表記されることもあるが<sup>3)</sup>、本稿では、論文等において採用例が多い表記である「規準化」を用いることとした。

## II. 規準化脈波容積測定回路の設計

今回の設計にあたっては、脈波を測定する回路が示されている先行研究<sup>8)</sup>を参考にした。これは規準化脈波容積ではなく通常の脈波を測定する回路であるため、直流と交流を別々に増幅する回路を設けた。また、ArduinoのAD変換範囲(0 ~ 5 V)全体を活用できるようにするため、増幅に用いるオペアンプをレールトゥレール型に変更した。設計にあたり、LTspice VII(Liner Technology社製)を用いて回路のシミュレーションをおこなった。

図2に回路図を示す。本回路は次の4つの部分に分かれる。(1)反射タイプのフォトリフレクタLBR-127HLD(Letex Technology社製)による脈波の導出部である。940 nmの近赤外光を照射し、反射光をフォトトランジスタによってとらえる。可変抵抗により出力を変更できるように設計した。(2)直流(DC)の増幅回路である。2回路入りのCMOSレールトゥレールオペアンプであるLMC6482(Texas Instruments社製)の1回路を用いて6倍の非反転増幅を行い、高周波ノイズを除外するために1.59 Hzローパスフィルタを付加した。(3)交流(AC)の増幅回路である。先行研究<sup>5) 6) 7)</sup>に従い時定数1秒(0.159 Hz)のハイパスフィルタによって交流成分を取り出している。DC増幅回路と同じくLMC6482の1回路を用い、同様に高周波ノイズフィルタも設けた。ArduinoのAD変換範囲(0 ~ 5 V)に合わせるため、2.5 Vを加えるレベルシフト回路を追加した。(4)オペアンプの電源部である。負電圧の増幅に対応するため、電圧コンバータLT1054(Analog Devices社製)を用いて負電圧を作り、オペアンプのV-端子に接続している。

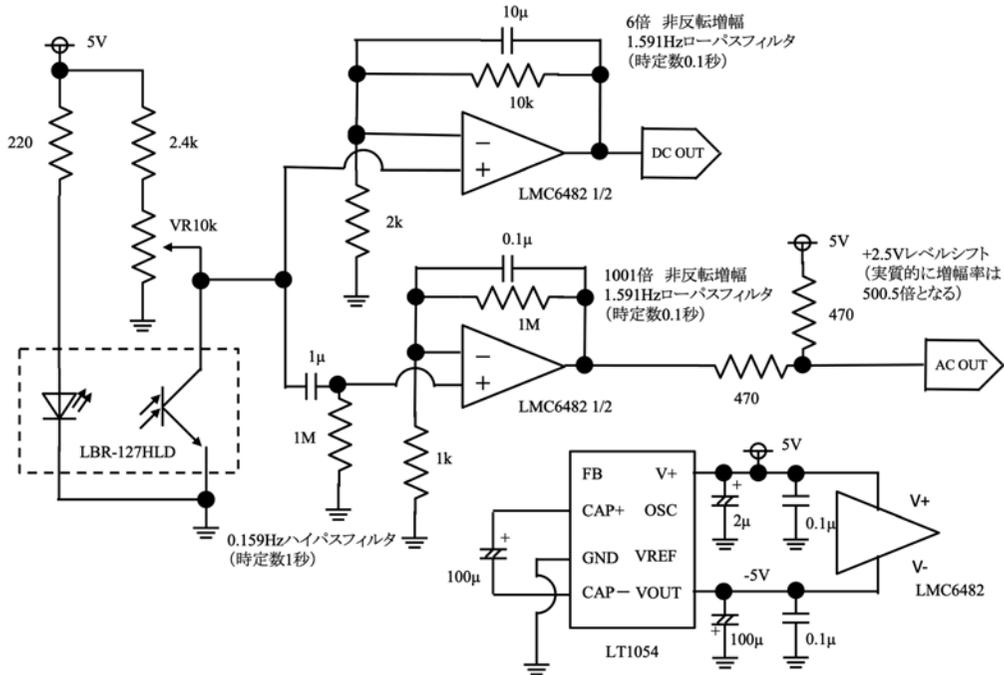


図 2 回路図

### Ⅲ. 規準化脈波容積測定回路の製作

以下は、ブレッドボードを用いて本回路を組む場合の部品配置を説明する。

(1) 脈波の導出部(図 3 および表 1)。2つの抵抗と1つの半固定抵抗と配線を接続し、LBR-127HLDの各端子を接続する。可変抵抗は精緻な調整ができるように多回転の半固定抵抗を用いた。

LBR-127HLDの加工は先行研究<sup>8)</sup>を参考にした。サーボの接続などに用いる汎用的な3線の平行ビニール線を用意し、それぞれの線に対して、LBR-127HLDのアノード端子、カソード端子とエミッタ端子をまとめたもの、コレクタ端子をはんだ付けする。平行ビニール線の反対側はピンヘッダをはんだ付けし、ブレッドボードに接続する。LBR-127HLDを測定部位、すなわち実験参加者の指先に固定するために、衣類用の面ファスナーを使用する。面ファスナーによって容易に脱着でき、実験の準備に便利である。

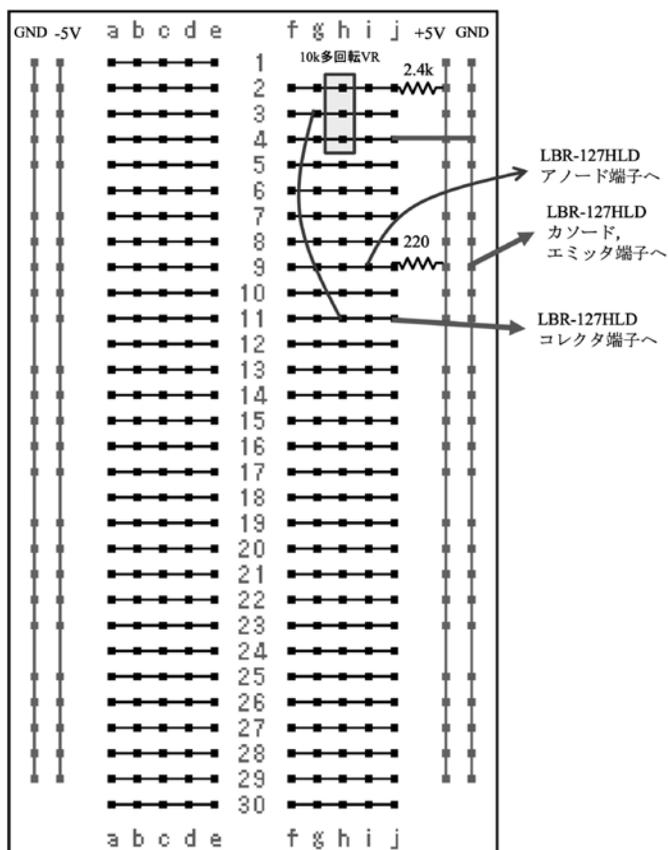


図3 脈波の導出部

表1 図3に含まれる部品とその配置

部品	配置
2.4kΩ抵抗	j2 - +5V
多回転半固定ボリューム たて型3296W(10kΩ)	h2 - h4
配線1	j4 - 右GND
配線2	g3 - h11
220Ω抵抗	j9 - +5V
LBR-127HLD	
アノード端子	i9
カソード, エミッタ端子	右GND
コレクタ端子	j11

(2) 直流 (DC) の増幅回路 (図4 および表2)。オペアンプ LMC6482 を配置し、脈波導出部からの出力を接続する。2 個の抵抗器と 1 個のコンデンサで増幅回路を作る。増幅された信号出力を Arduino アナログポート A1 端子に接続し、AD 変換を行う。

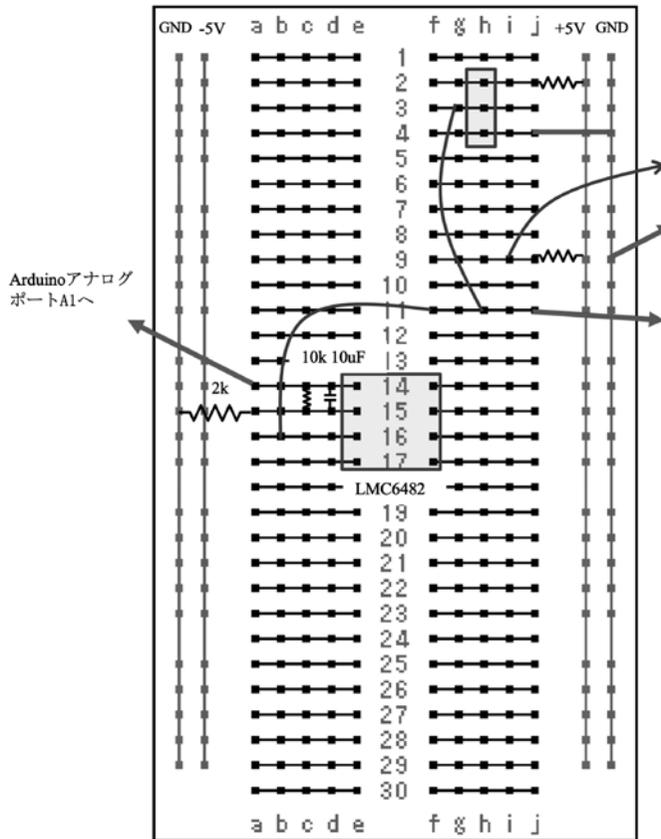


図4 直流(DC)の増幅回路

表2 図4に含まれる部品とその配置

部品	配置	備考
LMC6482	e14 - f17	1番ピンがe14, 8番ピンがf14
10kΩ抵抗	c14 - c15	
10µFコンデンサ	d14 - d15	
2kΩ抵抗	a15 - 左GND	
配線3	f11 - b16	
Arduino アナログポートA1	a14	

(3)交流(AC)の増幅回路(図5および表3)。1つのコンデンサと1つの抵抗器で構成されるハイパスフィルタを経由してオペアンプLMC6482につなぐ線を配置する。さらに2個の抵抗器と1個のコンデンサによる増幅回路, 2個の抵抗器によるレベルシフト回路を作る。増幅された信号出力をArduinoアナログポートA0端子に接続し, AD変換を行う。

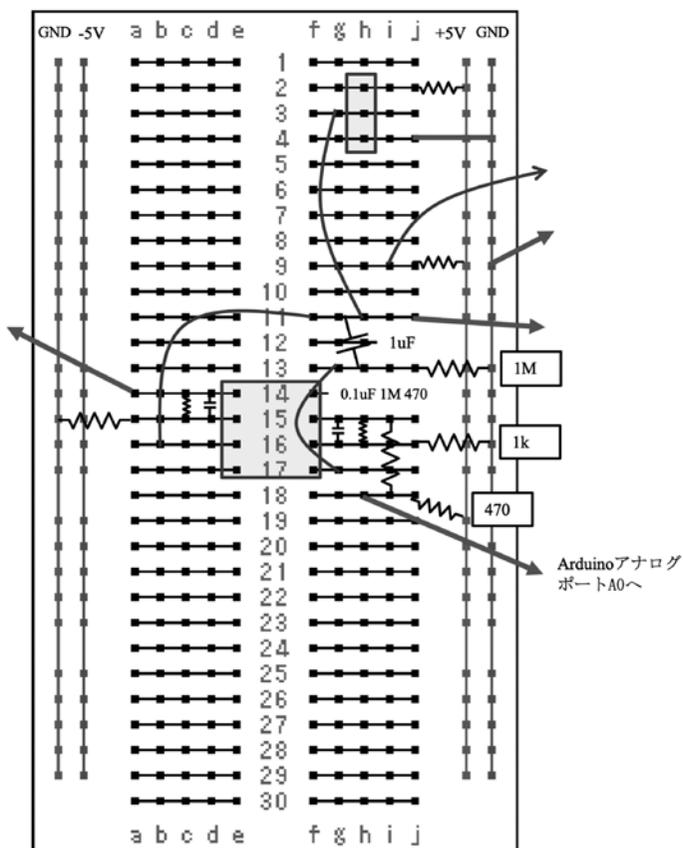


図5 交流(AC)の増幅回路

表3 図5に含まれる部品とその配置

部品	配置
1μFコンデンサ	g11 - h13
1MΩ抵抗	j13 - 右GND
配線4	g13 - g17
0.1μFコンデンサ	g15 - g16
1MΩ抵抗	h15 - h16
1kΩ抵抗	j16 - 右GND
470Ω抵抗	i15 - i18
470Ω抵抗	j18 - +5V
Arduino アナログポートA0	h18

(4)オペアンプの電源部(図6 および表4)。電圧コンバータLT1054 および3個の電解コンデンサを配置し、Arduinoより供給される+5Vの電圧から-5Vを作る。これをオペアンプLMC6482へ接続する。以上で本回路は完成する(写真1)。

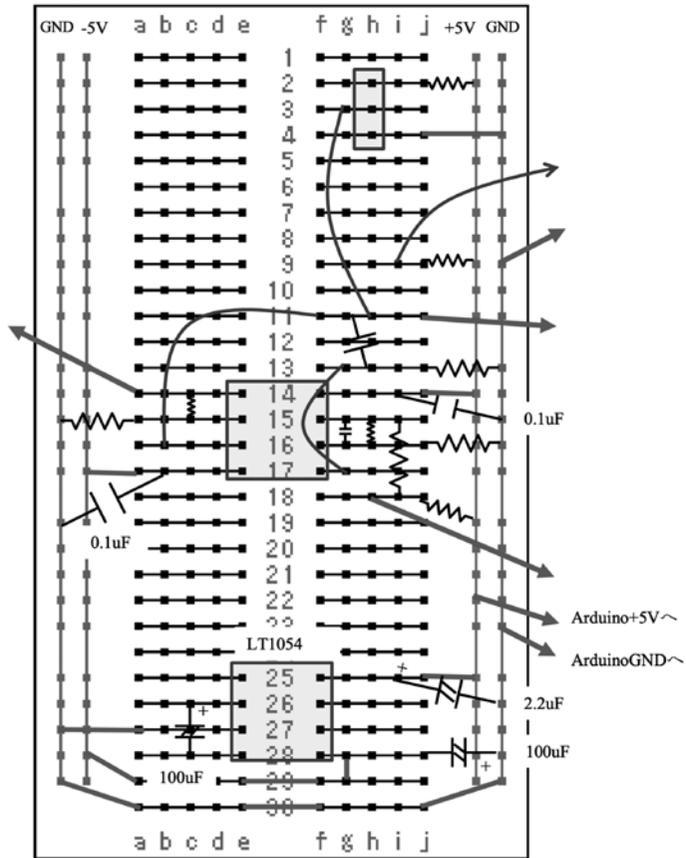


図6 オペアンプの電源部

表4 図6に含まれる部品とその配置

部品	配置	備考
配線5	j14 - +5V	
0.1µFコンデンサ	i14 - 右GND	
配線6	a17 - -5V	
0.1µFコンデンサ	b17 - 左GND	
Arduino +5V	+5V	
Arduino GND	右GND	
LT1054	e25 - f28	1番ピンがe25, 8番ピンがf25
配線7	j25 - +5V	
2.2µF電解コンデンサ	i25 - 右GND	+ピンがi25
配線8	a27 - 左GND	
100µF電解コンデンサ	c26 - c28	+ピンがc26
100µF電解コンデンサ	j28 - 右GND	+ピンが右GND
配線9	g28 - -5V	
配線10	左GND - 右GND	

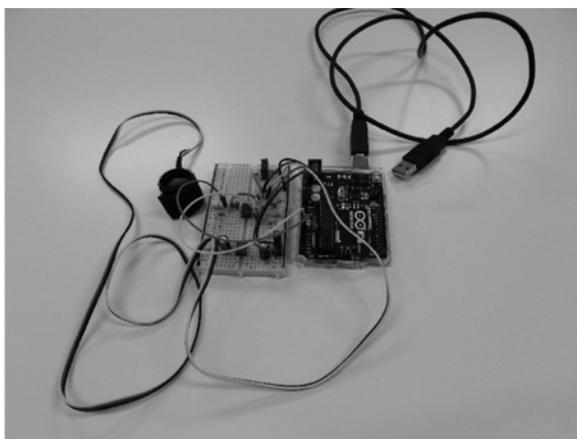


写真1 完成した装置

#### IV. 製作した回路を用いた測定画面の例

図7に、本装置を用いた測定画面の例を示す。Arduinoと通信を行うソフトウェア(Processing)を用い、上段から順に、交流(AC)波形、直流(DC)波形、規準化脈波容積(NPV)の算出結果が示されている。交流波形からは脈拍(画面上では心拍率を示す“HR”と表記している)、脈波波高(PVA)も求めている。NPVは自然対数変換した値が用いられることが多いため、本装置でもそれに従っている(画面上はlnと表記している)。ただし、この画面上では視認性を高めるために100倍して整数にした値を示している。得られたデータはExcelで取り扱えるCSV形式で記録されており、研究内容に応じた統計処理などに用いることができるようになっている。

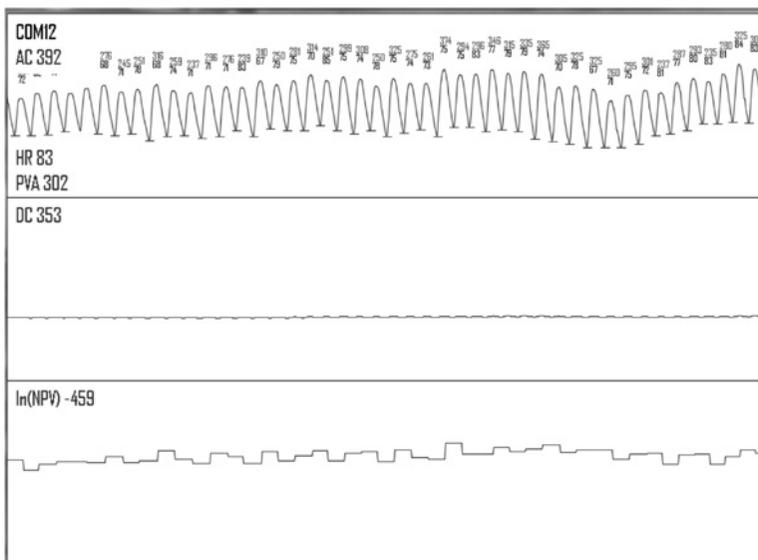


図7 測定画面の例

## V. まとめ

反射タイプフォトリフレクタLBR-127HLD, 2回路入りCMOSレールトゥレールオペアンプLMC6482, 電圧コンバータLT1054, 単一基盤マイクロコンピュータArduinoという, それぞれ安価に購入することが可能な部品を用いて, 規準化脈波容積を測定する装置を設計・製作することができた。Arduinoを含めて合計約四千円で製作できる装置となり, コンピュータ上にデータを記録できるシステムとなった。今後は, 本装置を用いて感情やストレスの実験研究を行うことや, 心理学実験実習などの教育に用いることが考えられる。

### <引用文献>

- 1) 櫻井優太：皮膚コンダクタンスを測定する安価な回路の設計と虚偽検出実験への応用 愛知淑徳大学論集 心理学部篇, Vol. 7, pp. 27-38, 2017.
- 2) 新美良純, 鈴木二郎(編)：皮膚電気活動, 星和書店, 1986.
- 3) 松村健太：脈波, 堀 忠雄, 尾崎久記(監修)：生理心理学と精神生理学 第I巻, 北大路書房, 2017, pp. 173-183.
- 4) 廣田昭久, 澤田幸農, 田中豪一, 長野祐一郎, 松田いづみ, 高澤則美：新たな精神生理学的虚偽検出の指標・規準化脈波容積の適用可能性, 生理心理学と精神生理学, Vol. 21(3), pp. 217-230, 2003.
- 5) 澤田 幸展：指尖容積脈波再訪, 生理心理学と精神生理学, Vol. 17(1), pp. 33-46, 1999.
- 6) Sawada, Y., Tanaka, G., Yamakoshi, K.: Normalized pulse volume (NPV) derived photoplethysmographically as a more valid measure of the finger vascular tone. International journal of psychophysiology, Vol. 41(1), pp. 1-10, 2001.
- 7) 澤田幸展, 加藤有一：指尖光電容積脈波の血行力学－規準化脈波容積を中心とした検討－, 生理心理学と精神生理学, Vol. 32(3), pp. 157-172, 2014.
- 8) 長野祐一郎, 小林剛史, 鈴木竜太：実験機器製作を通じた心理学教育プログラム実施およびその効果測定, 文京学院大学総合研究所紀要, Vol. 13, pp. 191-207, 2012.