

原 著

感圧センサー FSR400 の咬合力測定装置への応用可能性の検討

早瀬 泰博¹⁾ 早瀬 友克²⁾ 長縄 鋼亮³⁾
横矢 隆二¹⁾ 山村 理¹⁾ 藤原 周¹⁾

Investigating Application of force sensing resistor FSR400 for occlusal force measuring analysis system

HAYASE YASUHIRO¹⁾, HAYASE TOMOYOSHI²⁾, NAGANAWA KOSUKE³⁾,
YOKOYA RYUJI¹⁾, YAMAMURA OSAMU¹⁾, FUJIWARA SHU¹⁾

目的: オーラルフレイルとなった高齢者の多くは要介護・要支援認定を受けており、介護療養型医療施設、特別養護老人ホーム、老人保健施設などの介護施設に入所しているか、在宅であっても往診による在宅療養を受けている状況が考えられ、オーラルフレイルを診断するにはベッドサイドでの検査が必要である。そこで、小型で安価な感圧センサー FSR400 の咬合力測定システムへの応用により小型化の可能性を検討した。

方法: 入力端子は、薄膜感圧センサー FSR400 (INTERLINK ELECTRONICS 社製)、USB インターフェイスは、ARDUINO UNO R3 (ARDUINO SRL 社製)、その制御、測定値表示にノート PC ProBook4525 (ヒューレットパカード社製) を使用した。入力端子はセンサーの破壊防止のため、緩衝材として 0.18mm ラテックスシート、0.5mm ワッシャーをストッパーに使用し、ステンレスプレートで外装した。インターフェイス、測定値表示は ARDUINO 言語によるプログラミングにより制御、10N から 10N 毎に 100N までの負荷荷重を 5 回繰り返して、測定値を記録した。

結果: 測定値 Ω と負荷荷重 N 間には相関係数 $r = -0.83$ のかなり強い負の相関が得られた。さらに、回帰分析により y (負荷荷重 N) $= -0.54 \ln x$ (測定値 Ω) $+ 4.84$ 対数近似式が得られた。

結論: 感圧センサー FSR400 の咬合力測定装置への応用の可能性が認められた。算出された近似式をプログラムに組み込めば、咬合力 (N) が表示される。さらにこれらのプログラムをフラッシュメモリー等に書き込めば、小型の携帯用咬合力測定装置の作製も期待できる。

キーワード：オーラルフレイル、咬合力測定、感圧センサー

Purpose: The elderly who are approved for the Certification of Long-Term Care and Needed Support have high tendencies of oral frailty. Considering these individuals who have been staying at either a long term care facility or receiving in home nursing services, it is necessary to provide a method for the bedside diagnosis of oral frailty.

Thus, we investigated the feasibility of the application of a force sensing resistor FSR400 that is compact and affordable for use in an occlusal force analysis system.

Methods: The measuring terminal used for this system is INTERLINK ELECTRONICS INC's force sensing resistor FSR400. The USB interface used is ARDUINO SRL's ARDUINO UNO R3. The system

¹⁾ 朝日大学歯学部口腔機能修復学講座歯科補綴学分野
〒 501-0296 岐阜県瑞穂市穂積 1851

²⁾ 公立学校共済組合中国中央病院歯科口腔外科
〒 720-0001 広島県福山市御幸町大字上岩成 148-13

³⁾ 朝日大学歯学部口腔病態医療学講座口腔外科学分野
〒 501-0296 岐阜県瑞穂市穂積 1851

¹⁾ Department of Prosthodontics, Division of Functional Science and Rehabilitation, Asahi University, School of Dentistry
1851 Hozumi Mizuho-city Gifu Japan 501-0296

²⁾ Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Chugoku Central Hospital of the Mutual Aid Association of Public School Teacher's
148-13 Miyukicho Kamiwanari, Fukuyama-city, Hiroshima Japan
720-0001

³⁾ Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Division of Oral Pathogenesis and Disease Control, Asahi University, School of Dentistry
1851 Hozumi Mizuho-city Gifu Japan 501-0296
(2022 年 4 月 7 日受理)

control and output display terminal used is HP INC's ProBook 4525. To prevent damage to the measuring terminal, it was insulated with a 0.18mm latex film as a shock absorbent, 0.5mm washer as a stopper and stainless steel plates as an outer layer. The program written in the Arduino program language controls the system and data analysis, and provides a user interface to the data. The data was collected and recorded by applying a load to the measuring terminal which was increased from 10N to 100N by 10N increments, for a total of five iterations.

Results: As the load to the measuring terminal was increased, electrical resistance of the sensor decreased, which indicated a high negative correlation of ($r=-0.83$) between the weight increase and the electrical resistance. Therefore, a logarithmic approximation formula ($y=-0.54\ln x+4.84$) was calculated to convert it into an applied load in Newtons.

Conclusions: The application of the force sensing resistor FSR400 for an occlusal force measuring analysis system was confirmed feasible. Additionally, the system control program can also be installed to flash memory, which enables manufacturing of a hand held device that is capable to measure and analyze occlusal force.

Key words : Oral frailty, Measure occlusal force, Force sensing resistor

I. 緒 言

日本は、世界で類を見ないスピードで高齢化が進んでいる。2021年の内閣府の調査報告では高齢化率28.8%と超高齢社会にすでに突入しており、2030年には人口の1/3が高齢者となる予測も報告されている¹⁾。高齢者はフレイル^{2,3)}に陥りやすく、フレイルとなった人は、当然、口腔レベルでも機能低下がありオーラルフレイルが発生している⁴⁾。このオーラルフレイルの状態に合わせた介護食品が各食品メーカーより提供されている。日本介護食品協議会が規定したユニバーサルデザインフードは、「かむ力、飲み込む力」により「容易にかめる」「歯ぐきでつぶせる」「舌でつぶせる」「かまなくてよい」に区分し⁵⁾、介護対象者に適した介護食を分類している。農林水産省が規定する咀嚼配慮食品の規格JAS「そしゃく配慮食品の日本農林規格」でも「容易にかめる食品」「歯ぐきでつぶせる食品」「舌でつぶせる食品」「かまなくてよい食品」と4分類されている⁶⁾。オーラルフレイル対策のための口腔機能評価項目のひとつに咬合力があるが⁷⁾、各レベル毎で利用者の咬合力測定を行い平均値、区間推定等により基準値が推定できれば対象者の測定値からオーラルフレイルの状態に適合した介護食品選択ができる。また、加齢に伴い脳血管疾患（脳梗塞、頭蓋内出血等）患者数は増加しており⁸⁾要支援、要介護認定を受けている高齢者には片麻痺を起している症例も多い。片側の三叉神経領域を障害されても顎運動は両側性協調、両側対称性効果により大きな症状は現れない^{9,10)}ことが通説だが若干の筋萎縮の報告¹¹⁾もある。また、右側の大脳組織損傷の40%には半側空間無視が生じる¹²⁾ことも知られている。半側空間無視の中には口腔内の

片側に認知障害が生じた症例報告¹³⁾もあり、同症例では片側咀嚼が行われている可能性が考えられる。こういった加齢や疾患から口腔機能の低下や障害のある者に対し、全体的な咬合力の低下、左右咬合力の差異の測定が可能であれば、咀嚼サイクルの解析と合わせて咀嚼形態及び利用している介護食品に合った補綴物が必要であり、頭頸部腫瘍の術後、脳血管疾患、神経筋疾患、加齢による廃用等からの舌機能低下を代償する舌接触補助床¹⁴⁾が製作される様に、従来の歯及び周囲組織の形態的欠損補綴である歯科補綴とは異なり各個人の口腔機能低下の状態に適した口腔機能を代償する歯科補綴が目標とされ、その一助となる事が期待される。

しかしながら、フレイルとなった高齢者の多くは要介護認定を受けており、介護療養型医療施設、特別養護老人ホーム、老人保健施設などの介護施設に入所しているか、在宅であっても往診による在宅療養を受けている状況が考えられ、ベッドサイドで測定できる小型で携帯可能、および操作が単純でリーズナブルな咬合力測定システムが有用であると考えられる。咬合力測定には咬合力分析システム用フィルムデンタルプレスケール（GC社製）、咬合接触検査装置T-スキャン（ニッタ社製）、個歯咬合力測定装置オクルーザルフォースメーター（長野計器社製）があるが、前者2装置は天然歯、歯科補綴による欠損のない咬合歯列の存在が前提であり専用の分析装置が必要でコストがかかる。またオクルーザルフォースメーターは小型で簡便であるという利点があるが、T-スキャンとオクルーザルフォースメーターは現在、販売が終了している。この状況を考慮し、小型で安価な薄膜感圧センサーFSR400の咬合力測定装置への応用可能性を検討する

ことを目的に、荷重測定システムを開発し分析した。

II. 研究方法

1. 荷重測定システムの開発

1) 測定システム概要

入力端子には、薄膜感圧センサー FSR400 (INTERLINK ELECTRONICS 社製)¹⁵⁾ を使用した。高分子薄膜フィルムデバイスの一つでアクティブに加えられた力(圧力)の増加に伴って、電気抵抗値が減少する特性を持っている。USB インターフェイスには、ARDUINO UNO R3 (ARDUINO SRL 社製) を、その制御、測定値表示にノート PC ProBook4525 (ヒューレットパカード社製) を使用した(図1)。ARDUINO UNO は、オープンソースデバイスでありハードウェアの使用及び設計が全て開示されており、さらに搭載されている Atmel の AVR マイコンに書き込まれているソフトウェアもオープンソースである統合開発環境となっている¹⁶⁾。また、電源は USB ケーブルにより PC から取ることができ、付属のブレッドボードにジャンパーワイヤを差し込む事によりろう付けなしで回路が作成できるなど今回の様な試作開発には最適な装置であると考えられる。

2) 測定端子の構造

センサーへ直接荷重した場合、センサーの破損変形が必然であり、センサー保護と感圧面全面へ均一に荷重させるために緩衝材として 0.18mm ラテックスシートでセンサーを挟み、さらに 15 × 45mm ステ

ンレスプレートで外装後に 3 × 5mm スクリューで固定、荷重圧縮によるセンサーの物理的破損防止のため、0.5mm ワッシャーをストッパーとしてプレート間に挿入した。端子を接続するリード線はろう接後、エチレン酢酸ビニルのコーティングにより絶縁処理した(図2)。

3) 回路図

センサーは、負荷荷重により 0 ~ 1 MΩ 間を抵抗値が変動する可変抵抗である。過電流によるセンサー破損防止のため 10kΩ 抵抗を直列接続した。インターフェイスにかかる電圧は 5V のため、センサーの抵抗値は $R = 10000 \times V_{out} / (5 - V_{out})$ で算出される(図3)。Arduino UNO 側面に配列された 5V 電圧、GND (グラウンド)、アナログ入力 A0 (アナログ電圧を 1024 段階に変換して読み取る)、各端子にジャンパーワイヤを結線し対側をブレッドボードに結線することにより Arduino とボードを接続した。ブレッドボード上には 10kΩ 抵抗を直列配線、センサーに接続するジャンパーワイヤの配線により回路を形成した。このブレッドボードの多数の接続孔の下部にはクリップ状の金具がありジャンパーワイヤを挟み込む構造となっている。さらに側面 2 列は列毎に内部で連結し、内側は縦に連結する構造により、このボードを使用すればはんだ付けなしで回路形成が行える。スイッチサイエンス製の亚克力製 ABC プレートへのセットにより Arduino とボードが固定され、亚克力版により装置下部からの漏電が防止される(図4)。

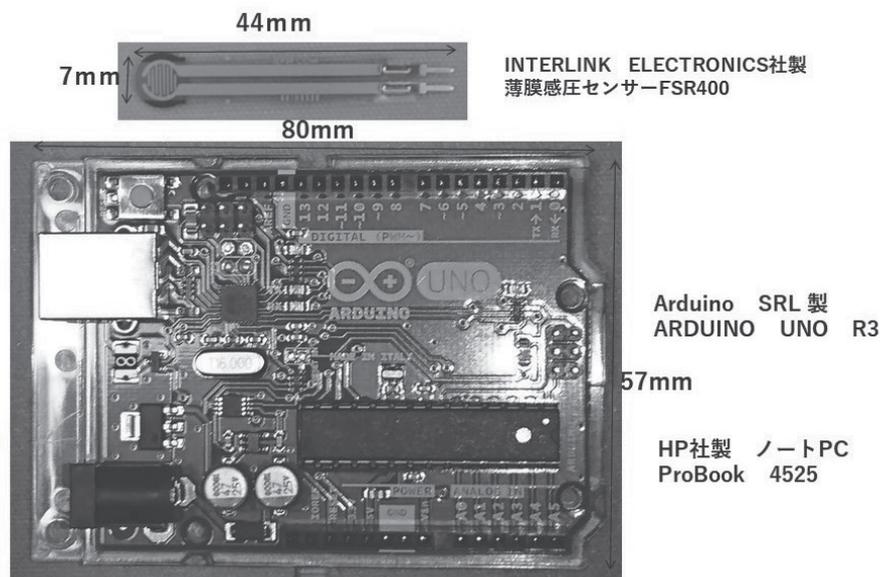


図1 The components of the system
システム構成機器



図2 The exploded view of the measuring terminal
測定端子構造

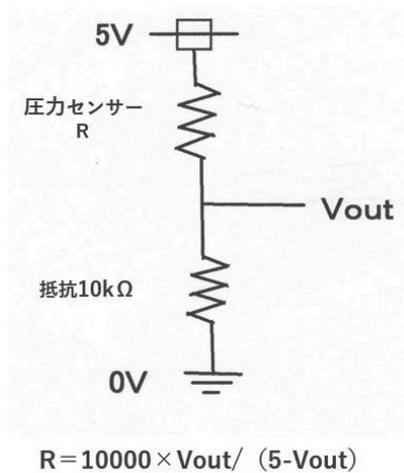


図3 The circuit diagram
回路図

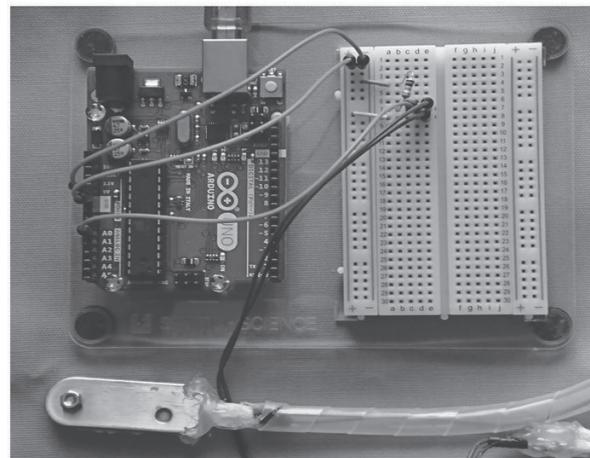


図4 The occlusal force measuring analysis system
測定システム

4) 測定システム制御

USB インターフェイスの制御，測定値表示は Arduino 言語（類 C 言語）によりプログラミングした。回路図に示したセンサーの抵抗値算出式の組み込みだけでは，データが連続で止めどなく流出するため，キーボードから“s”入力時のみデータ入力，“e”入力で測定終了をプログラムし，ノート PC のシリアルモニタに表示できるようにした。最後の“delay”（遅延コマンド）は，“END”表示前のプログラム終了を防止するために挿入した（図5）。Arduino 言語は特有の部分もあるがほぼ C++ に準ずる¹⁷⁾。C++ は UNIX を記述するために開発された C 言語を機能拡張したものである¹⁸⁾。

5) システムの動作確認

システムの稼働確認のテストを施行した。測定端子

に手指により適当な負荷を加えながら，“s”を入力する事によりシリアルモニタに測定値が表示され，“e”入力で“END”が表示されプログラムが終了する事を確認した（図6）。

2. 荷重負荷テスト

1) 簡易荷重負荷装置の作製

外形寸法（幅×奥行×高さ）18.5 × 18.5 × 60cm のスチールフレームを作製，フレーム上面に測定端子の固定用プレートを設置，下部にフックを取り付けた固定器具により測定端子を上面プレート中央に固定し，固定器具下部のフックにデジタル吊りはかりハカルド A（オルルド社製）を掛けた。はかりのフックを下方へ引っ張る事により端子への任意の荷重負荷を可能にする装置を作製した（図7，8）。

```

#define LP 13
#define SENSORPIN 0
void setup() {
  pinMode(LP, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  delay(1000);
  int IP;
  int NN;
  NN =1;
  while(NN) {
    IP =Serial.read();
    if(IP !=-1) {
      switch(IP) {
        case 's':
          Serial.print("Start\n");
          digitalWrite(LP, HIGH);
          NN =0;
          break;
        case 'e':
          Serial.print("End\n");
          digitalWrite(LP, LOW);
          NN =0;
          break;
        default:
          delay(1000);
          exit(0);
          break;
      }
    }
    int Val =analogRead(SENSORPIN);
    double V =Val*5.0/1024;
    double R =-0.1;
    if(0.005<(5.0-V)) {
      R =10*1000*V/(5.0-V);
    }
    if(0>R) {
      Serial.print("Infinity\n");
    }
    else{
      Serial.print(R);
    }
    Serial.print("[ohm]\n");
    delay(1000);
  }
}

```

図5 The system control program
システム制御プログラム

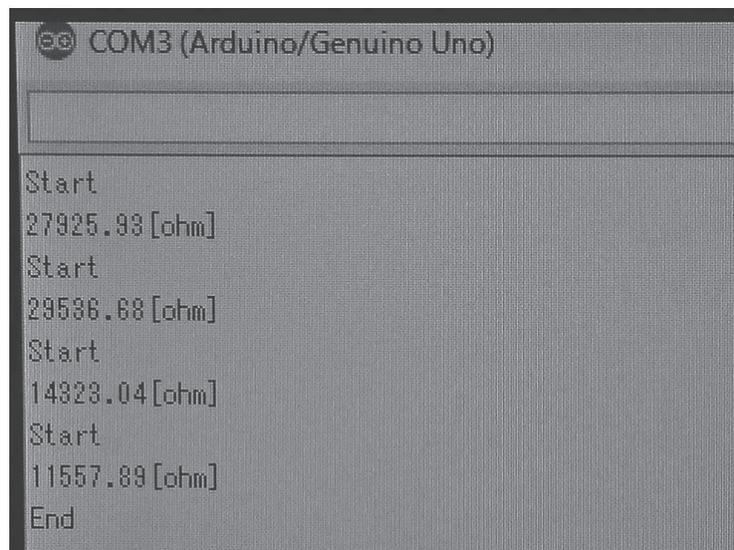


図6 The output display (serial port monitor of notebook computer)
測定値表示 (ノート PC シリアルモニタ)

2) データ採取

固定器具に測定端子を挿入後、下部フックに掛けた吊りはかりのフックを手動で垂直下方へ牽引する事により固定具上面板下面が端子上面を圧迫し端子への負荷荷重を行った。はかりの表示が 10N に達したと同時にキーボードの S キーをタッチしセンサーの抵抗値

をノート PC シリアルモニタ上に表示、記録した。この操作を荷重が 10N 増加する毎に 100N 表示まで繰り返し計測し、さらに、これを 5 回繰り返し測定値を記録した。今回は、センサーの荷重への反応状況と利用可能性を調べる初期テストとして荷重装置の安定荷重の限界もあり、100N までの荷重とした。

3. 分析方法

統計解析にはオフィス 2019 エクセル（日本マイクロソフト社製）を使用した。

Ⅲ. 結 果

荷重負荷テストによる測定結果は、ばらつきがあるものの相関係数 $r = -0.83$ のかなり強い負の相関が得

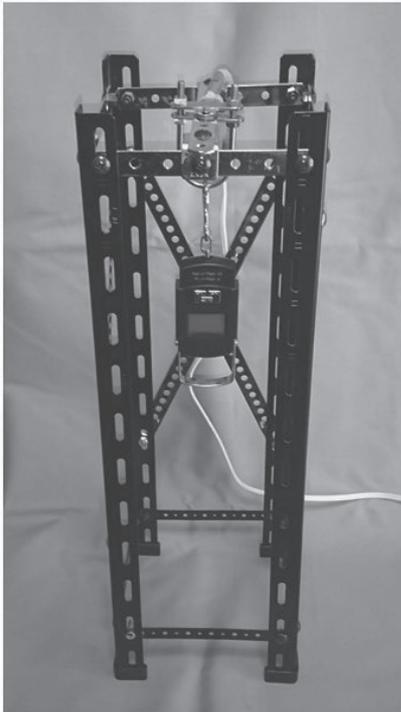


図7 The variable loading apparatus (front view)
可変荷重負荷装置（正面観）

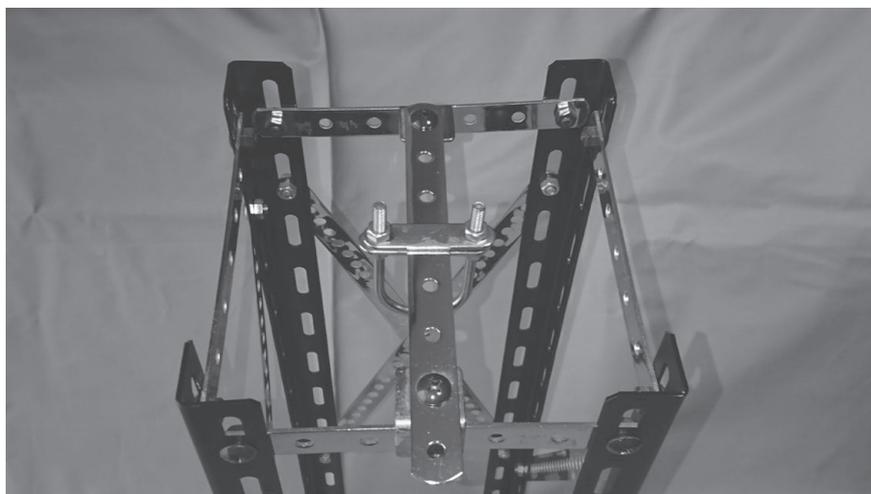


図8 The variable loading apparatus (upper view)
可変荷重負荷装置（上面観）

られた(表1). 抵抗値(Ω)表示の測定値を咬合力(N)表示へ変換の必要性からY軸を負荷荷重, X軸を抵抗値としてグラフ化した. 負荷荷重の増加に伴い抵抗値の減少がみられる負の相関が観察された. さらに回帰分析により対数近似式 y (負荷荷重 N) $= -0.54 \ln x$ (抵抗値 Ω) $+ 4.84$ が得られた(図9).

Ⅳ. 考 察

本研究では, 薄膜感圧センサー FSR400 を用いた荷重測定システムを開発し, 咬合力測定装置への応用を目指している. 咬合力の測定は, 咀嚼機能を定量的, 客観的に評価する上で有用であり, 小型で簡便な咬合力測定装置の開発は, 在宅療養者へのオーラルフレイルの口腔機能評価に使用できると考える.

荷重負荷テストでは, データのばらつきが認められたが, 荷重負荷装置の段階的荷重の精度, センサー全面への均一荷重の不確かさ等が考えられるも, 負荷荷重に伴う対数曲線に近似した抵抗値の減少は今回使用した圧力センサーのメーカー提供における性能グラフ(加圧力に抵抗値の変化¹⁵⁾)と適合する結果が得られた. これは, 咬合圧を想定した負荷荷重に対しセンサーが適正に反応していると考えられる.

今後の検討課題として, 荷重負荷量を咬合力に則した 600N まで荷重できる圧縮試験機を荷重負荷装置として使用する, テスト回数の増加及び, センサー全面に均一に荷重できる測定端子の構造改良によりデータのばらつきを収束させる事などが考えられるが, 算出される回帰分析による近似式をプログラムに組み込めば, 測定端子への荷重量 N (咬合力) が算出できる. これらのプログラムを IC チップに搭載されたフラッシュメモリー

表1 The data to apply a load from 10N to 100N for five iterations.
10N～100Nまで5回繰り返し負荷加重により測定された抵抗値

負荷荷重	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
10N	7239	5634	4798	7747	7445
20N	6570	3619	3672	4819	6358
30N	4608	2611	2758	3617	4163
40N	3635	2323	2503	3213	3333
50N	2929	2104	2263	2367	2768
60N	2736	2090	2234	2133	2610
70N	2534	1935	1893	1962	2534
80N	2397	1663	1852	1949	1893
90N	1317	1646	1824	1935	1770
100N	1004	1343	1730	1907	1450

Ω

r=-0.83

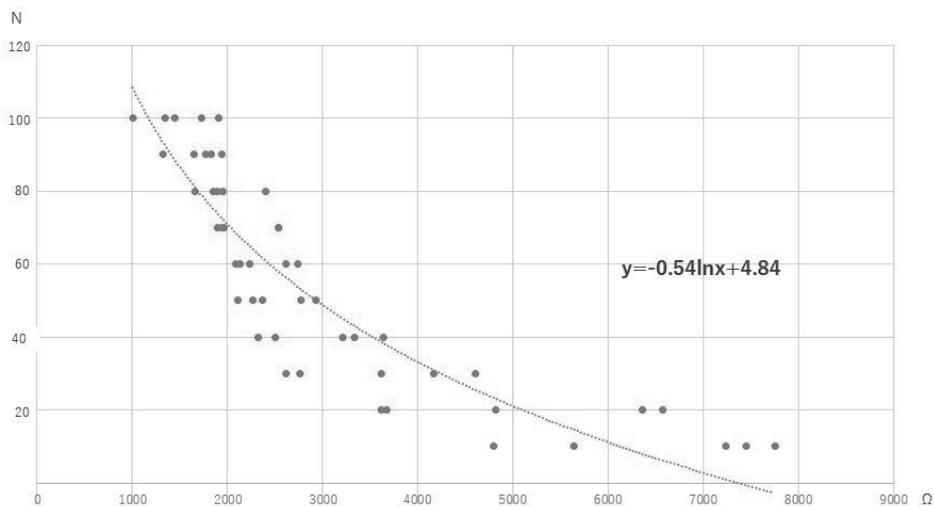


図9 The raw data distribution and the logarithmic approximation formula graph
測定値の分布と対数近似式

等に記載すれば、装置の小型化が期待でき、歯科往診時に咬合力測定が容易に行えると推察される。

V. 結論

感圧センサー FSR400 の咬合力測定装置への応用の可能性が示唆された。

本論文に関して、開示すべき利益相反状態はない。

文献

1) 内閣府 令和3年版高齢化社会白書. 令和2年度 高齢化の状況及び高齢社会対策の実施状況 第1章 高齢化

の状況, (https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2021/zenbun/03pdf_index.html).

2) 東京都健康長寿医療センター研究所 健康長寿新ガイドライン策定委員会. 健康長寿新ガイドライン エビデンスブック. 東京: 社会保険出版社; 2017: 84-95.

3) Fried P. L, Tangen M. C, Walston J, Newman B. A, Hirsch C, Gottdiener J et al. Frailty in older adults: evidence for a phenotype. The journals of Gerontology 2001; 56 (3): 146-156.

4) Tanaka T, Takahashi K, Hirano H, Kikutani T, Watanabe Y, Ohara Y et al. Oral Frailty as a Risk Factor for Physical Frailty and Mortality in Community-Dwelling Elderly. J Gerontol A Biol Sci

- Med Sci 2018; 73 (12): 1661-1667.
- 5) 日本介護食品協議会. ユニバーサルデザインフードとは, <<https://www.udf.jp/outline/udf.html>>.
 - 6) 農林水産省. そしやく配慮食品の日本農林規格 平成28年8月17日農林水産省告示第1568号, <https://www.maff.go.jp/j/jas/jas_kikaku/attach/pdf/kikaku_itiran2-132.pdf>.
 - 7) 公益社団法人 日本歯科医師会 歯科診療所におけるオーラルフレイル対応マニュアル 2019年版, <https://www.jda.or.jp/oral_flail/2019/>.
 - 8) 厚生労働省. 平成30年度版厚生労働白書一障害や病気などに向き合い, 全ての人々が活躍できる社会に— 図表1-2-4脳血管疾患患者数の状況, <<https://www.mhlw.go.jp/stf/wp/hakusyo/kousei/18/backdata/01-01-02-04.html>>.
 - 9) 東京医科歯科大学歯学部 顎口腔総合研究施設編. 顎運動とそのメカニズム. 東京: 日本歯科評論社; 1976, 188-239.
 - 10) 東京医科歯科大学歯学部 顎口腔総合研究施設編. 咀嚼の話. 東京: 日本歯科評論社; 1983, 70-75.
 - 11) 植松宏, 梅崎伸子, 酒井信明. 脳卒中片麻痺患者の咀嚼筋のCTによる観察. 老年歯学 1990; 4 (1): 33-36.
 - 12) 前田真治. 「半側空間無視」. 高次脳機能研究 2008; 28 (2): 214-223.
 - 13) 本田信一郎, 鈴木則夫. 左半側口腔内に特異的な症状を呈した脳梗塞の1症例～口腔内左半側空間無視の可能性～. 高次脳機能研究 2014; 34 (2): 252-259.
 - 14) 一般社団法人日本老年歯科医学会, 公益社団法人日本補綴歯科学会. 摂食・嚥下障害, 構音障害に対する舌接触補助床 (PAP) の診療ガイドライン, <<http://minds4.jcqh.or.jp/minds/pap/pap.pdf>>.
 - 15) INTERLINK ELECTRONICS. 圧力センサー FSR400, <<https://www.interlinkelectronics.com/fsr-400>>.
 - 16) 高橋隆雄. Arduinoで電子工作をはじめよう! [第2版]. 東京: 秀和システム; 2013, 10-11.
 - 17) 高橋隆雄. Arduinoで電子工作をはじめよう! [第2版]. 東京: 秀和システム; 2013, 38.
 - 18) 柴田望洋. 新・明解C言語入門編. 東京: SBクリエイティブ; 2014, 366-367.