**1. 序と目的**

**1.1 従来のBF装置の問題点**

バイオフィードバック(Biofeedback，以下BF)は，総合病院精神科における多くの専門領域で，有効な治療法とされている．さらに新型コロナウイルス(COVID-19)による行動制限の影響を受け，2020年以降，BFは健康管理のツールとして国際的に重要視されつつある．国内においても，血中酸素飽和度を測定するパルスオキシメーターやウェアラブルデバイスを用いたBFが注目されている[1]．

一方で，BFを必要とする現場の多くがBF機器を所持していないという現状がある[2]．稲森他[3]のアンケート調査によれば，BFが普及しない理由として，BFの教育機関の不足，操作の複雑さ，機材の高価さなどが挙げられる．既存のBF機器は，高精度なデータを取得できる一方で，人的・金銭的コストの高さが機器導入の障害となっている．また，従来のBF装置は持ち運びが難しく，クリニックなど特定の場所でしか訓練を行うことができないという問題がある．特に，長期的なBF訓練においては，頻繁な来訪が必要となるため，ユーザーにとって大きな負担となり得る．実際に，患者の中でもインターネットで調べて遠方からBF療法を希望するケースもあるという[2]．こうした問題に松野[4]もBF療法は装置を介在した学習であることから，高額な機器を用い，病院などの特別な場所でしか訓練できない状況では，発展が難航すると指摘している．こうした状況下では，安価で自宅でも手軽に利用できるBF装置の開発と普及が重要な課題となる．

**1.2オープンソースハードウェアを用いたBF装置の開発**

BF装置は，研究者の必要性に応じて，個別に開発されてきた経緯がある．例えば，振動BF装置[5]，斜頸用BF装置[6]など，様々な装置が開発されてきた[7-9]．しかし，そのような機器の開発には専門的な知識や技術が必要であり，装置開発のハードルは比較的高かった．

一方で，2000年頃から，アメリカを中心に個人がモノづくりを楽しみ，インターネットを介して多くの人と作成物を共有する「メーカームーブメント」が流行し，世界的にモノづくり文化が広まった[10]．これらの核となるのがオープンソースハードウェアArduino型マイクロコンピューター(以下Arduino型マイコン)とデジタルファブリケーションである．Arduino型マイコンは，比較的安価かつ十分な性能であり，アナログ/デジタル変換(以下AD変換)機能を有しており，さまざまなセンサーを接続することで測定機として利用可能である[11]．さらに，Wi-FiやBluetooth接続が可能なモデルも存在し，遠隔医療を含む多彩な場面で，測定器としての応用可能性が検討されている[4,12-14]．例えば，教師の授業中の認知負荷を測定するための皮膚温と皮膚コンダクタンス測定装置[15]，ローコスト筋電センサーのエンタテインメントへの応用[16]など，その他多様な計測機の開発が行われている[17-19]．これらの装置は，従来の計測機と比較しても十分な精度と信頼性を備えていることが確認されており，さらに無線接続を行うことでノイズ干渉抑制においても優れた性能を示すことが確かめられている[20,21]．

次に，デジタルファブリケーションとは，コンピューターと接続された工作機器を用いて，デジタルデータをもとに木材や金属などの各種素材を造形加工することを指す[22]．具体的には，3Dプリンター，CNCミリングマシン，3Dスキャナなどが代表例であり，これらの技術を活用することで，個別のニーズに応じた独自のデバイス製造が可能となる．これにより，例えば自作計測器のケースや電子基板の作成を個人でも行うことが可能となる．

以上の流れから，Arduino型マイコンとデジタルファブリケーション技術を用いることで，低コストで用途に応じたBF機器のプロトタイピングが可能となる．

**1.3 本研究の目的**

本研究は，従来型BF装置の問題点をふまえ，以下の5点に着目して，新たなBF装置を開発することを目的とした．(1)自由に持ち運びが可能で場所を問わず訓練を行えること，(2)低コストかつ入手容易な部品で生産可能であること，(3)フィードバック(Feedback，以下FB)刺激の有無を切り替えられること，(4)ユーザーが容易に訓練を行えること，(5)装置の使用方法や訓練方法などの情報に簡単にアクセスできること．さらに制御対象となる生理指標は，測定の容易さと理解しやすさを重視し，皮膚温を用いることとした．

**2. 方法**

**2.1 BF装置の概要**

　以上の5つの観点を踏まえ，開発時は以下の点に留意して開発した．まず，BF装置を軽量かつコンパクトなストラップ式のデザインとし，電池駆動とすることで，ユーザーが自由に持ち運びできるように設計した．次に，入手容易な部品とArduino型マイコン，デジタルファブリケーション技術の活用により，低コストかつ生産が容易な機器を目指した．また，FB刺激の有無を簡単に切り替えることができるスイッチを採用することで，ユーザーが自分の好みや環境に応じてFBの形式を変更できるようにした．さらに，皮膚温バイオフィードバックを行う際は，安静期間終了基準が複雑であり，実験室外での訓練を難しくする問題がある[23]．そこで，Arduino型マイコンに，独自ソフトウェアを書き込むことで，安静期間の自動管理を目指した．最後に，ユーザーがBF装置の操作方法や訓練手順を理解しやすいように動画等の資料を準備し，機器本体に貼り付けたQRコードからいつでも利用できるようにした．

**2.2 ハードウェアの開発**

BF装置の開発に用いた主なパーツは，マイコンのMaker Nano（Cytron Technologies Sdn Bhd社製），温度センサー(LM35DZ)，スピーカー(UGCM0903EPD5.0)，RGBLEDモジュール(RGBLED(AE-WS2812B))，小型LCDモジュール(ST7032(AE-AQM0802))，5V出力昇圧DCDCコンバータ(AE-XCL102D503CR-G)である．温度センサーには，双葉用1Mサーボ延長コードケーブル26AWG線(IndustrialMaker社製)，ピンヘッダー(Useconn Electronics社製)を用いた．センサーの測定時の誤差は±0.5℃であった．屋外でのBFも可能にするため，単4型ニッケル水素充電池，電池ボックス(BH-411-4P24)を用いた電池駆動の装置とした．これらのパーツは，何れも電子パーツ販売店で容易に入手可能である．

使用したFB機能の内容はスピーカーから出る音と，LEDによる光のみとした．これは，FBの種類を多く呈示した群は，FBなし群より課題成績が低下するという結果[23]を踏まえたためである．

**2.3 電子回路基板と専用ケースの開発**

ブレッドボード(Clienmero, Mecha Needs社製)とジャンパー線(共立電子産業社製)，および各電子パーツを組み合わせプロトタイプの作成を行った(Fig.1)．プロトタイプの動作を確認した後，複数生産を考慮して，電子回路基板の開発を行った．まず，ブレッドボード上で組んだBF装置の模式図(Fig.2)を基に，基板作成ソフトEagle Ver7.6.0 LightEdition(CadSoft)で回路パターンを設計した．次に，設計した回路パターンを基に，基板切削マシーン（KitMill CIP100，ORIGINALMIND社製）を用いて生基板(片面銅箔生基板 FR-1紙フェノール銅張積層板(厚さ0.8mm)，太陽商会社製)を切削し，専用の電子回路基板を作成した．

---------------------------------------------------------

(Fig.1挿入)

---------------------------------------------------------

---------------------------------------------------------

(Fig.2挿入)

---------------------------------------------------------

さらに，BF装置のケースを作成するために，基板のサイズを計測した後，3Dモデリングソフト(Metasequoia4 Ver4.8.1a，テトラフェイス社製)を用いて，ケースの3Dデータを設計した．これをもとにスライサー(MakerBot Desktop Ver3.10.1，MakerBot社製)から3DプリンターCreatorPro(Flash Forge社製）に出力して，ケースを作成した．ケースの素材には，弾力性，耐久性および防水性を兼ね備えたTPU素材を使用することで．破損防止と耐環境性を向上させた．

**2.4 ソフトウェアの開発**

　BF装置のソフトウェア開発には，Windows版Arduino開発環境1.8.19を使用した．本研究で用いたBF機器制御ソフトウェアは，長野による機器[11]をベースに開発した．これに加え，液晶ディスプレイの制御や安静期間の自動管理，スイッチによるFB有無の切り替え機能を実装した．特に，安静期間の自動管理に関しては，大河内[23]の安静期間の処理を参考に行った．具体的には，1分あたりの皮膚温の平均値の変動が連続する3分間で0.4℃以内となった場合，安静期間の終了を示す「\*」が液晶ディスプレイに表示され，ユーザーに知らせた．

参加者が装置を用いてBF訓練を行った際，その制御成績を確認し記録するためのソフトウェアは，長野[24]をベースにProcessing開発環境3.5.4を用いて作成した(Fig.3)．このソフトウェアは，リアルタイムで制御成績をグラフ化し，計測に不備がないかを確認するためのものである．さらに測定結果をPCのディスクドライブにCSV形式で保存可能であり，安静期間の終了を実験者に知らせることができる．ArduinoおよびProcessingで開発されたソフトウェアのソースコードと解説は，Webサイトに示している(http://protolab.sakura.ne.jp/OPPL/?p=1178)．

---------------------------------------------------------

(Fig.3挿入)

---------------------------------------------------------

**3. 結果**

**3.1 完成したBF装置**

装置のサイズは，縦92×横62×高さ17mmの直方体であり，重量は67gであった．製作費は総額3,000円程度であり，日常的なBF訓練に導入するため，合計10台作成した．本装置のFB機能として，1つ目の視覚FBにLEDライトを用いた．皮膚温上昇時に赤く点灯し，下降時は青く点灯した．1秒間で生じた皮膚温の変化量に応じてそれぞれ，強く点灯した．2つ目の視覚FBに液晶ディスプレイを用いた．1行目に皮膚温(℃)を表示して，2行目に1秒前からの皮膚温変化量(℃)を表示した．聴覚FBには，スピーカーを用いた．皮膚温上昇時に500Hz，下降時は1000Hzのビープ音を呈示した．また，下段の左側面にはFBの有無の切り替えを行うスイッチを配置した．スイッチを右にスライドするとFBが無効になり，左にスライドするとFBが有効になるようにした．右側面には電源用スイッチを配置した(Fig.4)．

---------------------------------------------------------

(Fig.4挿入)

---------------------------------------------------------

このBF装置を用いた訓練手順は，以下の通りである．最初に，装置右上のカラビナから指サックを外し，装置の右側面(上部)に収納した温度センサーを取り出し，非利き手の第2指腹測部に指サック（KM303CA, PLUS社製）で直接固定する．次に，右側面(下部)にある電源スイッチを前方に入れ装置を起動する．

安静状態を行う際は，装置左下部のスイッチを右方向にスライドさせ，FB無効の状態で行う．皮膚温を上昇させる訓練と，下降させる訓練を行う際は，スイッチを左方向にスライドさせてFBを有効にした状態で皮膚温の測定を行う．また，装置の使用方法を随時確認できるように，独自に作成した2分程度のインストラクション動画を装置背面に貼付したQRコードから提供した(https://youtu.be/FZqGBBIVEyY?si=Djrl4YQfWs0LgjBW)．

**4. 考察**

本研究は，訓練場所を問わず容易に皮膚温BF訓練が行える新たなストラップ式低コストBF装置の開発を目的とした．

Arduino型マイコンとデジタルファブリケーション機器を用い，さらに電池駆動としたことで，完成した装置は軽量かつコンパクトになり，自由に持ち運びができるようになった．開発に用いたパーツ一式は，何れも国内販売店で容易に入手可能であり，温度センサーやスピーカーなどは，数百円程度と安価であった．これにより，BF装置1台当たりの作成費用は総額3,000円程度となり，従来のBF装置よりも比較的低価格で生産でき，多数の装置を同時に用いることが可能となった．

また，スイッチでFB刺激の有無を任意に変更できるようにした．BFは，継続的に訓練を行うことでFBなしで心身の自己コントロールを維持できるようになる [25]．その実現を容易にするため，本装置はFBをオフにすることで，どの程度制御できるのかも確認可能にした．これに加えて，安静期管理ソフトウェアを内蔵したため，自宅での訓練手順がシンプルになり，ユーザーは訓練に集中しやすくなった．皮膚温BF訓練は，安静期間の切り上げ判断が難しい傾向にあるが[23]，この機能を追加したことにより自宅での訓練が容易となった．このようにBF機器開発にArduino型マイコンを導入することで，各参加者の制御量に対応してFB情報を調整するなどの訓練プロセスのパーソナライズや，様々なニーズに応じた機能追加が可能となる．

　本研究で開発した装置は，Arduino型マイコン内蔵の不揮発性メモリ容量が少なかったため，BF訓練データを記録する場合，装置とPCをUSBで接続する必要があった．今後は，より大容量の不揮発性メモリを搭載するArduino型マイコンを用いる，もしくは，長野・吉田[26]の心電図測定器のように，データ記録用のSDカードスロットを搭載することで，日々の訓練過程を記録・確認できるようにすることが必要だろう．また，棟方他[27,28]は，ゲーム性を加えることで，「飽き」が感じられにくくなることを報告している．PCやスマートフォンと連携し，エンタテインメント要素を追加することも有効であろう．これらの工夫によって，多くの人々がモチベーションを維持しながら訓練を継続し，BFの恩恵に預かることができるようになるだろう．

**参考文献**

[1] 辻下守弘(2022). 新しいバイオフィードバック技術がもたらす功罪　*The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine*, *59*, 366-371.

[2] 志和資朗・佐々木高伸(2003). 総合病院精神科領域におけるバイオフィードバックの臨床応用 *バイオフィードバック研究*，*29*，21-28.

[3] 稲森義雄・稲森里江子・松永一郎(1988). わが国に

おけるバイオフィードバックの研究および応用の現

状 : アンケート調査より *バイオフィードバック研*

*究*, *15*, 1-4.

[4] 松野俊夫(2023). バイオフィードバック研究と私

*バイオフィードバック研究*, *50*, 18-23.

[5] 土門宏樹・三善潤・本田富美子・石橋寛二(1988). 振

　　動バイオフィードバック装置の開発とその応用 *下*

*顎運動機能とEMG論文集*, *6*, 1-4.

[6] 斎藤巌・ワイスセオドラ・吾妻千鶴・八代信義・奥

瀬哲(1985). 斜頸用バイオフィードバック・トレー

ニング装置の試作について(神経・筋) *心身医学*,

*25*, 104.

[7] 八木昭宏(1979). 小型バイオフィードバック装置の試作 *バイオフィードバック研究*, *7*, 53-55.

[8] 橘芳實・渋谷敏昭(1983). 脳波・筋電位によるバイオフィードバックモニターの改良とその書痙治療への応用　*バイオフィードバック研究*, *10*, 32-36.

[9] 大須賀美恵子・遠山裕美・中沢一雄・下野 太海

(1982). 汎用バイオフィードバックシステムの試作

*バイオフィードバック研究*, *9*, 53-57.

[10] Anderson, C. , (2012). Makers:The new industrial

revolution. *New York:Crown Business.(クリス・ア*

*ンダーソン，関美和(訳). メイカーズ：21世紀の産*

*業革命が始まる NHK出版).*

[11] 長野祐一郎(2022). 自作測定機器を用いたバイオフィードバック　*バイオフィードバック研究*，*49*，77-81.

[12] 山口健治・櫻井芳雄(2013). Arduinoマイコンを用

いたリアルタイムの行動実験制御とデータロギング

*生理心理学と精神生理学*，*31*，203-212.

[13] 川原繁樹・岩竹淳・原田敦史(2019). Arduinoを用

いたボート競技による計測装置の開発 *石川工業高*

*等専門学校紀要*, *51*, 1-6.

[14] Mohamed,A.,Mohamed,E.,&Wael,A.,(2024).

Revolutionizing Alzheimer’s detection: an advanced

telemedicine system integrating Internet-of-Things

and convolutional neural networks *Neural Computing*

*and Applications*, *36*, 16411-16426.

[15] 山森光陽・長野祐一郎・徳岡大・草薙邦広・大内善広(2023). 生理心理学的指標を用いた授業中の教師の認知負荷の把握 *日本教育工学会論文誌*,*47*, 127-139.

[16] 長嶋洋一(2015). 内受容感覚バイオフィードバックによる"癒し系エンタテインメント"の考察 *エンタテインメントコンピューティングシンポジウム2015論文集*, 1-7.

[17] 宮西祐香子・長濱澄・森田裕介(2017). 指尖容積

　　脈波計測装置による学習活動時のストレス測定と主

観評価の関連分析 *日本教育工学会論文誌*, *41*,149-

152.

[18] Kazi,S.S.,Bajantri,G.,& Thite, T.,(2018). Remote

heart rate monitoring system using IoT *International*

*Research Journal of Engineering and*

*Technology*, *5*, 2956‒2963.

[19] 長野祐一郎・永田悠人・宮西祐香子・長濱澄・森田裕介(2019). IoT皮膚コンダクタンス測定器を用いた授業評価 *生理心理学と精神生理学*, *37*, 17-27.

[20] Ahamed, M. A., Ahad, M. A. U., Sohag, M. H. A., &

Ahmad, M.,(2015). Development of low cost wireless

biosignal acquisition system for ECG EMG and EOG

*Proceedings of International Conference on*

*Electrical Information and Communication*

*Technology*, 195‒199.

[21] Fuentes del Toro, S., Wei, Y., Olmeda, E., Ren, L.,

Guowu, W., & Diaz, V.,(2019). Validation of a low-

cost electromyography (EMG) system via a

commercial and accurate EMG device: Pilot study

*Sensors,* *19*, 5214.

[22] 総務省(2015). ファブ社会の基盤設計に関する検

討会報告書ファブ社会推進戦略~Digital Society3.0~

[23] 大河内浩人(1990). 皮膚温制御におよぼす訓練課題とフィードバックの効果 *バイオフィードバック研究*，*17*，8-14.

[24] 長野祐一郎(2016). 自作測定装置で学ぶ皮膚温バイオフィードバック *バイオフィードバック研究*，*43*，49-51.

[25] 竹林直紀・福永幹彦(2001). 行動変容支援ツールとしての応用精神生理学―バイオフィードバックと自律訓練法―，*日本保健医療行動科学会年報*，*16*，80-91.

[26] 長野祐一郎・吉田椋(2018). 低コスト生体計測器を利用した心身相関体験プログラムの実施 *生理心理学と精神生理学*, *36*, 53-61.

[27] 棟方渚・中村光寿・田中伶・土門裕介・松原仁(2009). 攻撃行動をともなうバイオフィードバックゲーム *情報処理学会*, *50*, 2969-2977.

[28] 棟方渚・櫻井高太郎・中村光寿・吉川浩・小野哲雄(2015). バイオフィードバックゲーム”The ZEN”のトレーニング効果とエンタテインメント性-長期実験観察と治療応用の一症例の報告- *デジタルゲーム研究*，*7*，67-78.

**図表**

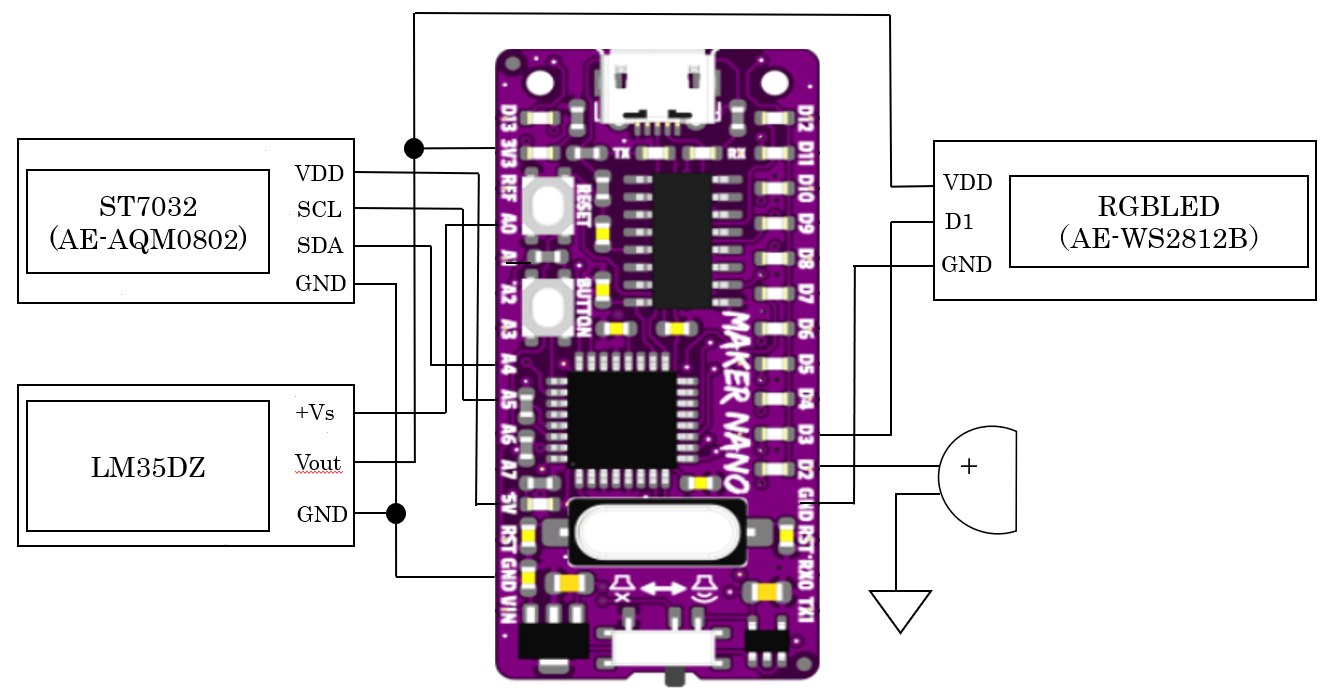
Fig.1

Prototype development of the BF device



Fig.2

Schematic diagram used for the development of the BF device



ダイアグラム

自動的に生成された説明

Fig.3

Screen display during measurement in the Processing development environment

グラフィカル ユーザー インターフェイス, アプリケーション

自動的に生成された説明

Fig.4

Appearance and component placement of the self-made strap-type BF device

ダイアグラム

自動的に生成された説明QR コード

自動的に生成された説明