

研究報告

アロエベラを素材とするバイオメモリスタによるモジュラーシンセサイザーの
検討**The modular synthesizer including biomemristor using *Aloe vella* L**

西田 騎夕

Kiyu NISHIDA

九州大学芸術工学部音響設計学科
Department of Acoustic Design, School of Design
Kyushu University

城 一裕

Kazuhiro JO

九州大学芸術工学研究科/YCAM
Faculty of Design
Kyushu University / YCAM

概要

近年、ポストデジタルメディアを背景として様々な素材を用いたシンセサイザーが提案されており、それぞれの方法でコンピュータでは作れないような音の探求が進められている。本論文では、アロエベラを素材とするバイオメモリスタを用いたモジュラーシンセの開発について検討する。メモリスタとは1971年にLeon Chuaによってその存在が指摘された電気素子であり、抵抗、コンデンサ、コイルに次ぐ第四の電気素子である。Chuaの指摘以降、実際にその特徴に対応する物理現象は長い間未発見のままであったが、近年発見され再び注目されることとなった。バイオメモリスタとは生物由来の素材を用いて作られたメモリスタのことであり、現在までに様々な生物がメモリスタの特徴を持つことがわかっている。メモリスタは他の3素子が持たない非線形な特徴を示すため、電気回路に新たな可能性をもたらすことが期待されている。本研究では、バイオメモリスタのもつ非線形性と不安定性を用いた新たなモジュラーシンセを制作することを通して新しい音の表現方法を拡張することを目的としている。

1. 背景

コンピュータ技術の発達には音楽制作を民主化し、全ての人が容易に音楽制作を楽しめるようにした。このような現代において、コンピュータ技術そのものが音楽制作に与える影響は大きい。事実、コンピュータ音楽の技術発展は革新的に性能が向上する電子機器に加えて、ユーザー志向型のプログラミングツールやインターフェースに特徴付けられつつある(Miranda and Wanderley 2006)。この結果、多くの作品の焦点となっているのは、どのようにコンピュータを使って新しい音

楽を制作するかということである。

その一方で、生物をアナログ回路に接続することで得た微生物の生体電気信号を電圧制御オシレータの制御に使用し、音に変換した作品 *Sonomatter*(Ahn 2019) や電気モーターを特定の音に対応する正確な回転数に加速または減速させ、回転するコイルと磁気ピックアップによって音を生成するシンセサイザー *MOTOR SYNTH*(Gamechanger Audio) などはポストデジタルメディア(Cascone 2000)としてコンピュータでは作れないような音表現を行い、その可能性を拡張している。

本論文では、このポストデジタルメディアの音表現の一つとして、アロエベラを素材としたメモリスタを使用したモジュラーシンセの検討を通して、メモリスタの非線形性を用いた新しい音の可能性、またアロエベラを扱うことによるその拡張性について議論する。

1.1. メモリスタ

メモリスタ(Chua 1971)とは1971年にLeon Chuaによってその存在が指摘された電気素子であり、抵抗、コンデンサ、コイルに次ぐ第四の電気素子である。メモリスタとはメモリー(記憶)とレジスター(抵抗)からできた造語であり、その名の通り電気特性としてその抵抗値がそれまでに通過した電荷の量に関係するという特徴を持つ。数学的に表すと素子の抵抗値:メモリスタンス M は、

$$M = R(q) = \frac{d\delta(q)}{dq} \quad (1)$$

ここで、 q は電荷、 δ は磁束を表す。この式からもわかる通り、サイン波などの交流電源が印加されると電流と電圧の関係は非線形なものになる。また、図1は理想的なメモリスタが示す電流電圧特性グラフである。Chua

は理想的なメモリスタは電流電圧特性グラフにおいて (0, 0) を通るかつその点で交わる対称性のある 8 の字になると指摘している。

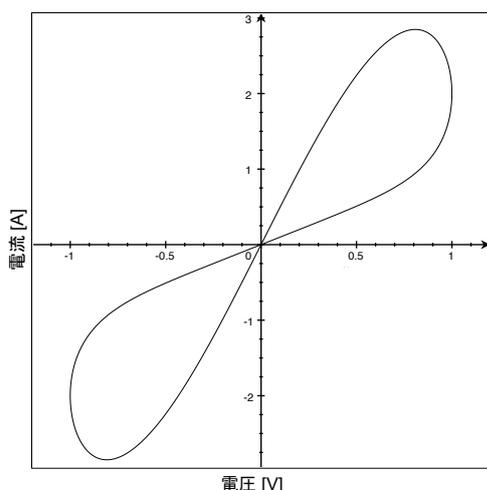


図 1 理想的なメモリスタが示す電流電圧特性グラフ

さらに全ての 2 つの電極を持つ抵抗スイッチングを基礎とした不揮発性記憶装置はどのような素材であるかに関わらずメモリスタであると指摘し (Chua 2011), ある素子がメモリスタであるための条件として以下の 3 つを挙げている (Adhikari, Sah, Kim, and Chua 2013).

1. 両極性周期信号が印加された時, 電流電圧特性グラフにおいて周期的な“ピンチドヒステリシスループ”を示す.
2. ある臨界周波数から印加する周波数を増加させていくと, ヒステリシスループの範囲は単調に減少する.
3. “ピンチドヒステリシスループ”は印加される周波数が無限大に向かう時, 原点を通過する一価関数へと縮小する.

加えて, メモリスタには, ピンチドポイントにおいて電流電圧特性グラフが交差するものと交差せずに接するだけのものがあることも合わせて指摘している。

1.2. バイオメモリスタ

現在までに様々なシステムにおいてメモリスタの存在が確認されており, 植物などの生物も例外ではない. 特に生物由来の材料を用いたメモリスタはバイオメモリスタと呼ばれている. バイオメモリスタでは上記のメモリスタであるための 3 条件について以下のように補足できる. 1. の条件においてピンチドポイントが (0, 0) を通るといのは, 理想的なメモリスタは受動素子

であるためエネルギーを蓄えないからであるが, 植物組織の場合, その細胞内のはたらきにより電気エネルギーをそれ自体が有していることがあるため (0, 0) 以外の場所にピンチドポイントが位置することがある (Braund and Miranda 2017b). また, 植物組織自体がコンデンサの機能を有し, 植物組織においてはメモリスタとコンデンサが並列に繋がれていると考えることができるため (Markin, Volkov, and Chua 2014), 3. の条件は「“ピンチドヒステリシスループ”は印加される周波数が無限大に向かう時, 楕円形になる.’と書き換えることができる.

このメモリスタが示す非線形な特性を利用し, Miranda らは粘菌の一種であるモジホコリを素材としたバイオメモリスタを用いたコンピュータの開発と作品の制作を行なった (Miranda, Braund, and Venkatesh 2018). その中で彼らは, メモリスタのもつ非線形性を入力音と出力音のマッピングに使用することで, 入力音に対してランダムではなく, 一定の関係性を持った出力音を取得し, それを利用した作曲を行なった.

モジホコリ以外にもメモリスタの特徴を示す生物は確認されており, Volkov らはアロエベラ, オジギソウ, りんごの果実などがメモリスタの特徴をもつことを発見 (Volkov, Tucket, Reedus, Volkova, Markin, and Chua 2014) し, またそれらのはたらきをモデル化 (Markin, Volkov, and Chua 2014) した. また, アロエベラは葉が 3 次元的な形状をしているため電極を指す場所によって異なるメモリスタの特性を得ることができると指摘されている (Volkov, Reedus, Mitchell, Tucket, Forde-Tuckett, Volkova, Markin, and Chua 2014).

2. 連続周期信号に対するアロエベラの電氣的応答の測定

アロエベラがメモリスタの特徴を示すことを確かめるため, 先行研究 (Volkov, Reedus, Mitchell, Tucket, Forde-Tuckett, Volkova, Markin, and Chua 2014) に従って実験を行なった. 先行研究では, アロエベラがサイン波や三角波のような周期的な信号に対してメモリスタを示すこと, またアロエベラに刺す電極の位置や印加する周波数によってその特性が変化することが報告されている.

2.1. 実験方法

図 2 に測定の際のブロックダイアグラムを示した. ここで, R は $10.01k \Omega$ のシャント抵抗値, I は回路全体を流れる電流値, V_P はアロエにかかる電圧値, V_R はシャント抵抗にかかる電圧値, V_{FG} はファンクションジェネレータの電圧値を示している. この回路から, ア

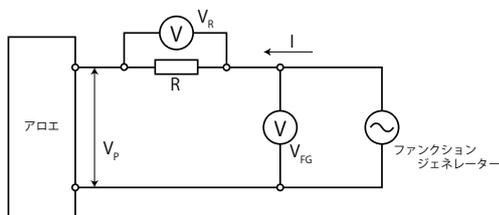


図2 測定と電気刺激入力のブロックダイアグラム

ロエベラにかかる電圧と流れる電流はオームの法則を用いて、

$$V_P = V_{FG} - V_R \quad (2)$$

$$I = V_R / R \quad (3)$$

で求められる。実際の測定では、まず印加するサイン波の最適な振幅を調べるためにその周波数を 0.1Hz に固定し、電極をアロエベラの葉の上下に刺した状態で複数の電圧を印加した (実験 1.)。先行研究においては、2 V 以上の電気刺激の印加で結果が出るとの記述はあるが、実際の実験で用いられた信号の具体的な数値は明示されていない。

次にその実験で確認した電圧を用いてファンクションジェネレータのサイン波の周波数をその性能の下限である 0.01Hz から 1000Hz まで 10 倍ごとにそれぞれ印加し、デジタルオシロスコープを用いて V_R と V_{FG} をデータとして取得する実験を行なった。ただし、印加する信号の周波数が 0.01Hz と 0.1Hz の場合は、その周期が長いのでデジタルオシロスコープの性能の限界によりデジタルなデータを取得することができなかった。そのため、電圧計 2 つの値を読み取り手でデータにした。また、アロエベラに電極を刺す場所は先行研究に従い、アロエベラの維管に沿って刺す実験 2. と、アロエベラの葉の上下に刺す実験 3. の 2 種類の実験を行なった。

これらの実験では、ファンクションジェネレーター (LEADER 10MHz FUNCTION GENERATOR LG 1311)、デジタルオシロスコープ (Tektronix TBS 1052 Digital Oscilloscope)、デジタルマルチメーター (FLUKE 87 V Si TRUE RMS MULTIMETER, FLUKE 101 600V CAT III MULTIMETER) を用いた。

2.2. 実験結果と考察

実験 1. において 2.52V の振幅のサイン波を印加した際に得られたアロエベラを素材としたメモリスタにおける電圧の時間変化と電流電圧特性を示す (図 3)。図 3 の上図において黄色線は V_{FG} 、青色線は V_R 、赤線は V_P の値の変化を示している。印加するサイン波の振幅が小さくなると、デジタルオシロスコープの電圧の分解

能の限界により、 V_R の値の時間変化を正確に読み取ることができなくなる。 V_R の値が正確に読み取れなくなると式 (2) より、 V_P の値も正確に読み取れなくなってしまう。測定結果から、本実験において電流電圧特性グラフの特徴を捉えるのには 2.52V 以上の振幅のサイン波の印加が必要であるとわかった。

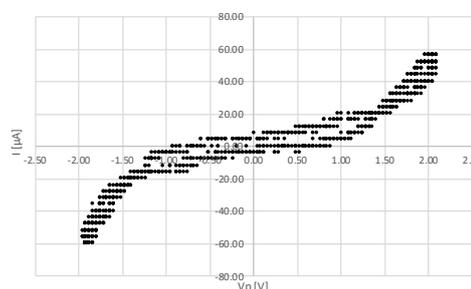
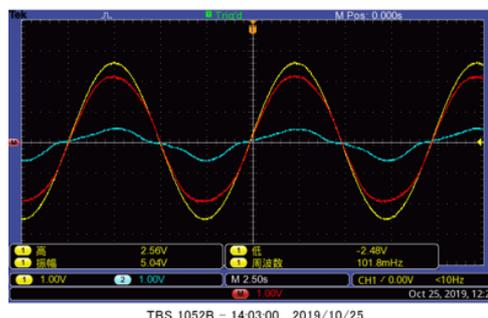


図3 実験 1. 振幅 2.52V のサイン波を印加した際のアロエベラを素材とするメモリスタにおける電圧の時間変化 (上) と電流電圧特性 (下)。

実験 2. および実験 3. の結果をそれぞれ図 4, 図 5 に示す。印加したサイン波の振幅は 2.5V であった。

図 4 から分かる通り、実験 2. では印加するサイン波の周波数が 0.01Hz のとき、電流電圧特性グラフがヒステリシスなループにはなるもののピンチポイントは観測できなかった。しかし、印加するサイン波の周波数が小さくなるほどヒステリシスループの領域が狭く、(0, 0) 付近が近づいていくことが観測できた。そのため、0.01Hz 以下のサイン波の印加によりメモリスタの特徴を観測できる可能性があると考えられる。一方で、図 5 から分かる通り実験 3. では、印加するサイン波の周波数が 0.01Hz のとき電流電圧特性グラフがヒステリシスなループになり、さらに I の値が $-1.5\mu\text{A}$ 付近ピンチポイントがあることがわかる。したがってメモリスタであると確認できる。実験 3. においては印加するサイン波の周波数が 0.1Hz の場合においてもピンチドヒステリシスループが観測できた。また、印加するサイン波の周波数が 0.1Hz よりも 0.01Hz の方が理想的なメモリスタに近いことが観測できたため、0.01Hz よりも低い周波

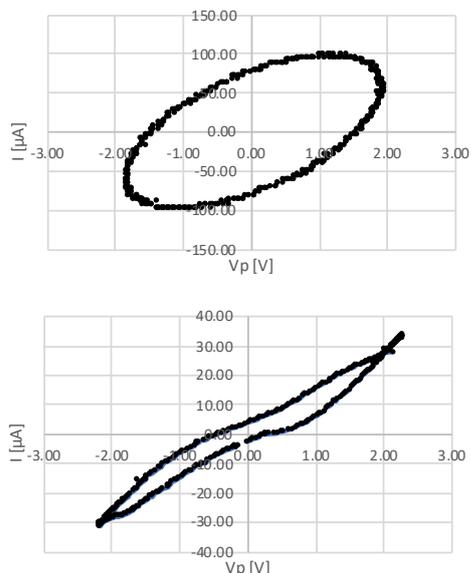


図4 実験2. アロエベラの葉の維管に沿って電極を刺した時の電流電圧特性グラフ。入力サイン波の周波数は上から 1000Hz, 0.01 Hz.

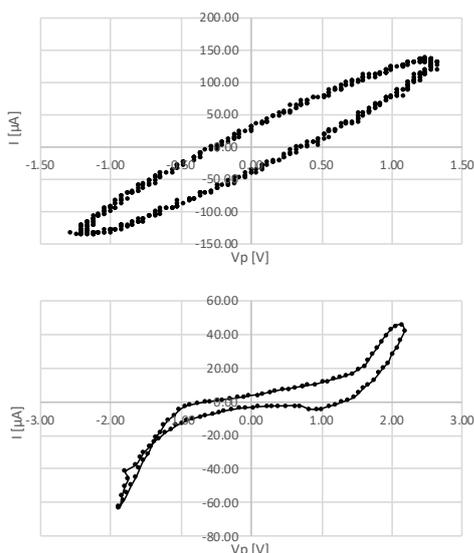


図5 実験3. アロエベラの葉の上下に電極を刺した時の電流電圧特性グラフ。入力サイン波の周波数は上から 1000Hz, 0.01 Hz.

数の入力により、より理想に近いメモリスタが得られることが予想できる。

実験2., 実験3. より印加する信号の周波数が低いほど理想的なメモリスタの特徴が観測できることがわかった。また、理想的なメモリスタでは前述の3つの条件にあるとおり印加する信号の周波数が大きくなるとグラフは一価関数に収束するが、アロエベラの場合は、植物組

織自体が抵抗とコンデンサを並列につないだような機能を有するため、その特性は楕円形に近づくことも確認できた。本実験からは、アロエベラの葉の上下に 0.1Hz 以下のサイン波が印加された場合にメモリスタの特性を示すことが確認された。また、葉の上下に電極を刺す実験3. の方法の方が高い周波数でもメモリスタの特徴を得ることができることがわかった。より理想的なメモリスタの特性を得るためには、より低い周波数の信号を印加する必要があることが予想されるが、実験機材の都合上でできなかった。また、実験2.において、0.1Hz, 10Hzのグラフでシャント抵抗の値から求めた電流の値が正しく測定できていないことが確認できた。これは、測定の際に V_R が小さく、 V_P が大きかったということである。すなわち、アロエベラの抵抗が大きかったと考えられる。これらの実験を通して、アロエベラ自体が持つ抵抗値やメモリスタンスは2つの電極の位置関係、電極を刺す深さなどに影響を受けることがわかった。

3. モジュラーシンセへの実装方法の検討

今後、さらなる実験として離散周期信号に対するアロエベラの電氣的応答の測定を行う予定である。Mirandaらはモジホコリを素材としたバイオメモリスタを用いたバイオコンピュータの開発において、Raspberry Pi¹とDA, ADコンバーターを用いてバイオメモリスタをコンピュータを構成する素子として扱った。(Braund, Venkatesh, and Miranda). この中で、彼らは、モジホコリを材料としたメモリスタの特性を変化させるパラメータとして“dwell time”と“measurement offset”を定義している。“dwell time”とはメモリスタに離散化された周期信号の電圧1ステップを印加する時間の長さである。例えば、“dwell time”が2秒、印加する信号が160ステップに離散化されたサイン波であるとき、その信号の1周期は320秒となる。“measurement offset”とは、信号1ステップが入力されてから電流を測定するまでの時間差であり、“dwell time”に対する百分率で表される。メモリスタに印加する電圧を急激に変化させると電流スパイクが観測できる。そのため、“dwell time”を短くしていくと、メモリスタが電圧変化に対して反応する時間が短くなる(Braund and Miranda 2017a)。したがって、これら2つのパラメータは読み取られる電流の値に影響する。(Volkov, Reedus, Mitchell, Tuckett, Volkova, Markin, and Chua 2014)

先行研究のようにRaspberry PiとDA, ADコンバーターなどを用いた測定方法は費用対効果が高く、また周期の長い信号に対する応答をデジタルデータとして取得

¹ Raspberry Pi, <https://www.raspberrypi.org/>

できる。さらに周期離散信号の入力により、電流スパイクも測定できる。この先行研究にしたがってアロエベラのメモリスタ特性を細かく調べることは、新たな可能性を提供するだろう。

4. 今後の方針

アロエベラが 0.1Hz 以下の長い周期を持つサイン波に対してメモリスタの特徴を示すという結果から、どのようにモジュラーシンセの開発に活かせるかを検討する。シンセサイザーの LFO (Low Frequency Oscillator) モジュールは、その名の通り一般的には可聴域よりも低い周波数を発振し、変調のために用いられる。信号を変調することで、ビブラート、トレモロ、ワウワウ、パンのようなエフェクトを可能とする(坂上 暢 - Digiland 島村楽器)。LFO は十分低い周波数を発振できるため、アロエベラがメモリスタの特性を示せると考えられる。LFO をメモリスタに入力することで、周波数の低い図 3 の上図の赤線のような非線形な電圧の変化が得られる。つまり、アロエベラを素材とするメモリスタを LFO のエフェクターとして用いることで、今までにはなかったような音が作り出せる可能性がある。また、アロエベラによるメモリスタが示す特性は電極を刺す深さや場所、両極の距離に影響されることから、左右のチャンネルで異なるアロエベラによるメモリスタを LFO のエフェクターとして用いることで、その微妙な違いをきくこともできるだろう。

このように、メモリスタを用いるとアナログ回路のみで非線形な LFO を発振できるためモジュラーシンセとして扱うことで、様々な音表現の可能性が開けるだろう。今後、アナログシンセサイザーを用いて実証を行なっていく予定である。

5. 謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科研費・若手研究 (A) ポストデジタル以降の音を生み出す構造の構築 [17H04772] および基盤研究 (B) 日本庭園の総合的アーカイブの開発をめぐる研究 [19H01225] の支援を受け実施された。

6. 参考文献

- Adhikari, S. P., M. P. Sah, H. Kim, and L. O. Chua (2013). Three fingerprints of memristor. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* 60(11), 3008–3021.
- Ahn, S. H. (2019). Sonic transformation with liv-

ing matter. In *In proceedings of ISEA symposium (Inter-Society for the Electronic Arts)*, Gwangju, South Korea, pp. 462–465.

- Braund, E. and E. R. Miranda (2017a). An approach to building musical bioprocessors with physarum polycephalum memristors. In *Guide to unconventional computing for music*, pp. 219–244. Springer.
- Braund, E. and E. R. Miranda (2017b). On building practical biocomputers for real-world applications: Receptacles for culturing slime mould memristors and component standardisation. *Journal of Bionic Engineering* 14(1), 151–162.
- Braund, E., S. Venkatesh, and E. Miranda. *Phybox: A programmable interface for physarum polycephalum-based memristors*. *International Journal of Unconventional Computing* 14.
- Cascone, K. (2000). The aesthetics of failure: “post-digital” tendencies in contemporary computer music. *Computer Music Journal* 24(4), 12–18.
- Chua, L. (1971). Memristor—the missing circuit element. *IEEE Transactions on circuit theory* 18(5), 507–519.
- Chua, L. (2011). Resistance switching memories are memristors. *Applied Physics A* 102(4), 765–783.
- Gamechanger Audio. Motor synth. <https://www.gamechangersaudio.com/motor-synth>.
- Markin, V. S., A. G. Volkov, and L. Chua (2014). An analytical model of memristors in plants. *Plant signaling & behavior* 9(10), e972887.
- Miranda, E. R., E. Braund, and S. Venkatesh (2018). Composing with biomemristors: Is biocomputing the new technology of computer music? *Computer Music Journal* 42(3), 28–46.
- Miranda, E. R. and M. M. Wanderley (2006). *New digital musical instruments: control and interaction beyond the keyboard*, Volume 21. AR Editions, Inc.
- Volkov, A. G., J. Reedus, C. M. Mitchell, C. Tuckett, V. Forde-Tuckett, M. I. Volkova, V. S. Markin, and L. Chua (2014). Memristors in the electrical network of aloe vera I. *Plant signaling & behavior* 9(7), e29056.
- Volkov, A. G., J. Reedus, C. M. Mitchell, C. Tuckett, M. I. Volkova, V. S. Markin, and L. Chua (2014). Memory elements in the electrical network of mimosa pudica I. *Plant signaling & behavior* 9(10), e982029.
- Volkov, A. G., C. Tuckett, J. Reedus, M. I. Volkova,

V. S. Markin, and L. Chua (2014). Memristors in plants. *Plant signaling & behavior* 9(3), e28152.

坂上 暢 - Digiland 島村楽器. アナログシンセ超入門
～その3: lfo. <https://info.shimamura.co.jp/digital/guide/2018/02/122419>.

7. 著者プロフィール

西田騎夕 (Kiyu NISHIDA)

1996年東京都生まれ。2015年より九州大学芸術工学部音響設計学科で「音」を物理学、心理学、生理学また文化史、芸術学など多面的な方向から学ぶ。2018年4月より1年間ドイツのカールスルーエ造形大学に留学しメディアアート学部で立体音響を学ぶ。スピーカードームによる立体音響と観客のスマートフォンを利用した視覚インタラクションを用いたコンサートのための作品を制作。帰国後は九州大学芸術工学部音響設計学科城研究室に所属し、新しい楽器とそれによる音楽表現の拡張について研究を行う。

城一裕 (Kazuhiro JO)

1977年福島県生まれ。東京藝術大学芸術情報センター [AMC] 助教、情報科学芸術大学院大学 [IAMAS] 講師を経て、2016年3月より九州大学芸術工学研究院准教授。山口情報芸術センター [YCAM] 専門委員（非常勤）。博士（芸術工学）。専門はメディア・アート。音響学とインタラクションデザインを背景とした現在の主なプロジェクトには、音響再生の常識を実践を通じて再考する「Life in the Groove」、参加型の音楽の実践である「The SINE WAVE ORCHESTRA」、ありえたかもしれない今をつくり出す「車輪の再発明」、音・文字・グラフィックの関係性を考える「phono/graph」などがある。



この作品は、クリエイティブ・コモンズ の表示 - 非営利 - 改変禁止 4.0 国際 ライセンス で提供されています。写しをご覧になるには、<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> をご覧頂くか、Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA までお手紙をお送りください。