

1/f ゆらぎの性質を持つ超音波によるもやしの生長促進実験 Experiment of growth promotion of bean sprouts by ultrasonic waves with 1/f fluctuation characteristics

齋藤 偲勇 棋¹
Shugo Saito

熊木 武志²
Takeshi Kumaki

1. はじめに

近年、我が国の農業は多くの問題を抱えている。人口の高齢化や度重なる自然災害の影響による、農業従事者と農地面積の減少は数十年前から続いており、問題の解決策は様々に議論されてきた。その中で、野菜を中心とした食糧安定供給の面に関する解決策として、施設園芸をはじめとした植物工場に注目が集まっている [1]。植物工場は、工場内の環境制御によって作物の安定した栽培が可能といった点に加え、人員削減効果や水耕栽培による無農薬栽培といったメリットが挙げられる。その一方、初期費用やランニングコストの高さから、図 1 に示すように、全体の収益が赤字となっている工場は少なくない [2]。こうした状況の中で、ICT (Information and Communication Technology) を利用した技術を導入して、スマート化を目指す工場が増えている。環境制御システムのほか、環境モニタリングや栽培、作業管理システムといった部分での導入例が多く、安定した栽培によって収益を上げようとする動きがみられる。近年では、IoT や AI などの最新技術を利用して、適切な肥料量や栽培環境の予測と制御を行うといった、より効率的に作物を生長させるための技術が取り入れられている。また、選果や包装装置等の収穫作業に関する技術の導入例も多く、多方面でのスマート化が進められている。実際に ICT を利用した技術を導入した工場は、導入していない工場と比べて赤字割合が低く、黒字となる割合が高くなっている [2]。以上のように、栽培品目の生産を安定させ、効率を上げる技術の開発は、植物工場が利益を出していくために今後も重要になってくると考えられる。

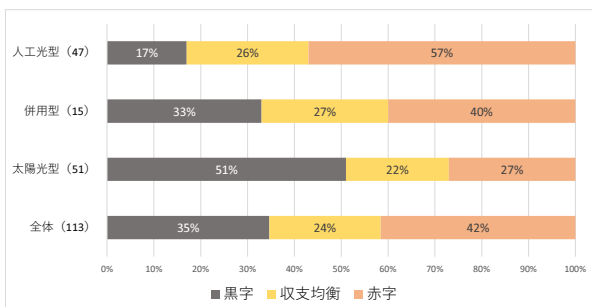


図 1: 令和 4 年度植物工場の直近決算。

我々は、こういった技術開発の一つとして、超音波

¹立命館大学電子システム専攻, Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan Univ.

²立命館大学電子情報工学科, Dept. of Electronic and Computer Engineering, Ritsumeikan Univ.

を用いて植物の生長を促進させる技術を開発してきた。これまでは、単純な超音波が野菜に与える影響について報告している [3], [4]。超音波が植物に与える影響はいまだに解明されていない部分が多いが、先に研究が進められ、すでに実用化されている LED 照明を用いた生長促進技術や環境制御技術との併用が可能であると考える。また、人の視覚や聴覚に影響を与えないため、作業員による植物工場での作業効率を低下させないといった点からも生産性向上が期待できる可能性があると考えられる。

2. 1/f ゆらぎの性質を持つ超音波の生成

超音波とは、周波数が 20 kHz 以上の、人が聞くことのできない音波である。超音波を利用した様々な応用技術がある中で、気体中、及び植物体内での動力的応用技術として、植物に対して超音波照射を行い、その影響を利用する研究が進められている [5]–[7]。これらは周波数や振幅値をはじめとして、超音波が持つ性質を決定する要素は多くあるため、特定の作物に対して適切な超音波条件を見つける事が重要となる。本論文では超音波に持たせる性質として、1/f ゆらぎに注目した。1/f ゆらぎとは、ものや状態が変化する際に生じるゆらぎのうち、自然界に普遍的に表れる現象であり、人間が心地いいと感じる変化である。これは人間工学の分野での研究が進んでいる [8], [9]。我々は、自然生物である植物にとっても、1/f ゆらぎが存在する空間は快適になり、生長に対して何かしらの影響があるのではないかと考えている [10]–[14]。そこで、1/f ゆらぎアルゴリズムを組込んだ超音波を利用することで、植物の生長に対する影響を検証する。

2.1. 1/f ゆらぎの性質

川のせせらぎ音や炎のゆらめき、木漏れ日の光といった、人が心地いいと感じる自然現象の中に 1/f ゆらぎが存在する。ここで用いている f とは、音の高さを決める周波数 f とは異なり、ある現象の時間的変化の性質を分解して得られる成分の周波数である [8]。この周波数成分を分解することでパワースペクトル密度が求められる。パワースペクトル密度は周波数成分毎の大きさを示し、ゆらぎの特性を表す。図 2 にパワースペクトル密度によるゆらぎの特性を示す。周波数とパワースペクトル密度の間に何の相関もないゆらぎは完全に無秩序な変化であり、白色雑音と呼ばれる。また、相関を持ち、低周波数に向かって増加していくにつれて変化の規則性が現れる。無秩序と規則的の間、すなわち傾きが -1 となる $1/f$ であらわされるものが、1/f ゆらぎであり、ランダムでも規則的でもない変化をする特別なゆらぎとなる [15]。

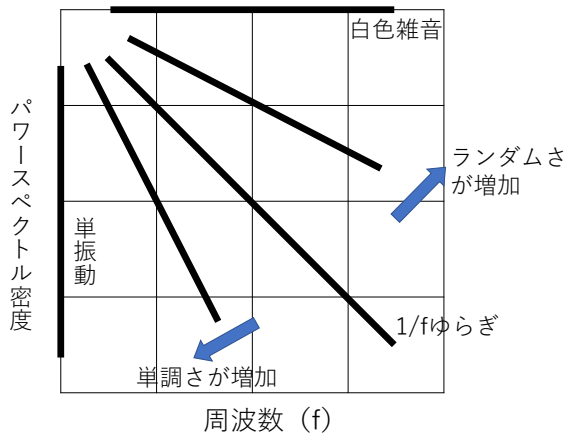


図 2: パワースペクトル密度によるゆらぎの特性.

2.2. 1/f ゆらぎのアルゴリズム

1/f ゆらぎを人為的に作成するアルゴリズムは、セルオートマトン法、1/2 積分法、間歇カオス法の 3 つが主に使用される。本論文では、プログラムで容易に実装が可能な間歇カオス法 [16] を用いる。間歇カオス法は以下の漸化式で表される。

$$\begin{aligned} 0 \leq N(t) < 0.5 \\ N(t+1) &= N(t) + 2(N(t))^2 \\ 0.5 \leq N(t) \leq 1 \\ N(t+1) &= N(t) - 2(1 - N(t))^2 \end{aligned} \quad (1)$$

このとき、時刻 t に対して $N(t)$ を 1/f ゆらぎの値とし、 $N(t+1)$ を $N(t)$ の次の値として扱う。(1) 式のアルゴリズムを、周波数が 20 kHz 以上である正弦波の式に組込むことで、超音波に 1/f ゆらぎの性質をもたせる事ができる。

1/f ゆらぎを組込んだ超音波は、python を使用して生成した。wav ファイルを作成するにあたっては、任意のサンプリング周波数、及び量子化ビット数の wav ファイルを読み書きが可能なライブラリ wavio [17] を使用した。1/f ゆらぎを超音波に組込む際、前述した間歇カオス法の (1) 式を以下のように変形させて使用した。

$$\begin{aligned} 0 \leq N(t) < 0.05 \\ N(t+1) &= N(t) + 0.06 \\ 0.05 \leq N(t) < 0.5 \\ N(t+1) &= N(t) + 2(N(t))^2 \\ 0.5 \leq N(t) < 0.95 \\ N(t+1) &= N(t) - 2(1 - N(t))^2 \\ 0.95 \leq N(t) \leq 1 \\ N(t+1) &= N(t) - 0.04 \end{aligned} \quad (2)$$

変形した理由は、 $N(t+1)$ の値が 0 または 1 付近で停滞することがあるためである。その防止策として、0

と 1 付近の値で定数を加減することによって停滞を防いでいる。ここで生成したゆらぎを評価するため、パワースペクトル密度を求めた。(2) 式を利用して python で生成した 1/f ゆらぎ値の時系列データによるパワースペクトル密度を図 3 に示す。これより、作成した 1/f ゆらぎ値のパワースペクトル密度の傾きは -1.073 となっており、図 2 で示した 1/f ゆらぎの特性を持っていることが確認できる。

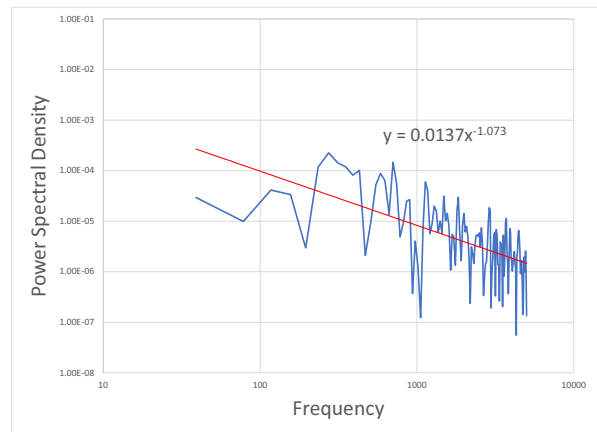


図 3: 生成した 1/f ゆらぎ値のパワースペクトル密度.

作成した 1/f ゆらぎのアルゴリズムを正弦波の周波数に適用する (図 4)。ゆらぎの周波数範囲は 20~45 kHz で、周波数が 1 秒間隔と 0.1 秒間隔ごとに 1/f ゆらぎの変化をする、2 種類の超音波を作成した。

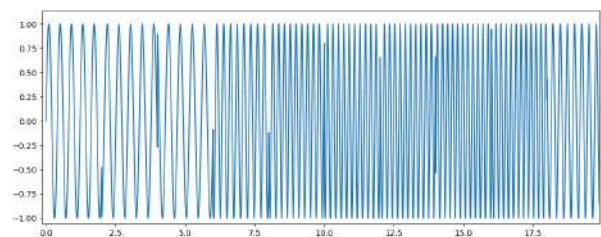


図 4: 正弦波の周波数に 1/f ゆらぎを組込んだ結果.

3. もやしへの超音波照射実験

本章では、作成した超音波を用いた実験を行い、超音波が植物の生長に与える影響について述べる。栽培作物はもやし (緑豆) を採用した。もやしは栽培期間が 1 週間程度と短く、育成に光を必要しない。また、水だけで栽培可能であり、超音波以外の生長に関する外的要因を減らすことができる。もやしは種子が発芽して子葉をつけるまで光を遮断して栽培を行うことで胚軸部分の生長を促し、生長初期段階での収穫を行う。他の研究では、葉や果実を収穫する植物に対する生長促進効果や、発芽処理前の種子に対して超音波処理を行い、発芽を速める効果を確認しているが、発芽から子

葉をつけるまでの生長初期段階での促進効果を確認したものは少ない [18]. もやしで生長促進の効果がみられた場合, 他野菜の発芽段階への応用が可能となり, 超音波を利用した生長促進技術の普及が見込まれる.

3.1. 実験環境

実験環境を図 5 に示す. 仕切りを作り 6 つの栽培室を用意し, 1 台のパソコンと 3 台のコンポーネント, 5 つのスピーカを使い, それぞれ異なる条件の超音波を照射する. $1/f$ ゆらぎの変化の間隔に加えて, 照射時間の違いを条件に加える. もやしは生長に光を必要としないので, 光を必要とする植物と違い, 朝, 昼, 夜という概念は存在しない. したがって, 1 日の時間帯によって照射時間を変化させるのではなく, 単純に一定時間ごとに照射と停止を繰り返した場合によるもよしの生長に与える影響を比較する. 0.1 秒間隔で $1/f$ ゆらぎの変化をする超音波を連続照射, 12 時間間隔照射, 6 時間間隔照射, 1 秒間隔で変化する超音波を 12 時間間隔照射, 6 時間間隔照射し, 超音波照射なしも用意して全部で 6 条件とした. 各条件 20 g ずつ緑豆を用意し, 発芽処理のための浸水時間は 24 時間, 発芽後の水やりは, 9 時と 21 時の 1 日 2 回, 室内温度は 27 度, 湿度は 60~75 %, 全体を遮光カーテンで覆い, 完全に光を遮断した環境下で実験を行った.



図 5: 実験環境.

3.2. 実験の結果と評価

発芽処理から 7 日後に収穫を行い (図 6~11) 評価を行った. 生長度合いの評価方法として, 収穫時の全体の重さと, 各条件のサンプル 100 本の平均長を計測した. 計測結果を表 1 に示す. 表 1 より, 0.1 秒間隔で変化する $1/f$ ゆらぎを 6 時間間隔で照射したもよしの平均長が一番大きく, 照射なしのもやしと比較して 1.26 mm 大きくなった. 全体の重さは, 1 秒間隔で変化する $1/f$ ゆらぎを 12 時間間隔で照射したもやし, 照射なしのもやしと比較して, 5.4 g 大きくなった. また, 0.1 秒間隔で変化する $1/f$ ゆらぎを組込んだ超音波を照射した場合をのぞき, 超音波を照射したもやし, 照射なしと比べてどちらも平均長が小さくなった. 一方で, 全体の重さは 0.1 秒間隔で変化する $1/f$ ゆらぎ

を組込んだ超音波を連続照射した場合をのぞき, 超音波を照射したもやしが, 照射していないもやしよりも大きくなった. このことから超音波を照射することで, もやし 1 本の長さ当たりの質量が大きくなることが考えられる. その比較を行うために, 全体の重さを平均長で割った値を表 2 に示す. これより, 1 秒間隔で変化する $1/f$ ゆらぎを 12 時間間隔で照射したもよしの, 長さ当たりの質量がより大きくなるのが分かった. また, 超音波を照射した場合, 全ての条件で, 照射なしのもやしより値が大きくなった. このことから, もやしに対して $1/f$ ゆらぎを組込んだ超音波を照射したとき, 同じ長さでも質量が大きい, すなわち密度や太さが大きいもやしを栽培することが可能であり, 特に, 1 秒間隔で $1/f$ ゆらぎを組込んだ超音波を照射したとき, その傾向が強く現れる可能性が分かった.



図 6: 超音波照射なし.



図 7: 0.1 秒間隔ゆらぎ/連続照射.



図 8: 0.1 秒間隔ゆらぎ/12 時間間隔照射.



図 9: 0.1 秒間隔ゆらぎ/6 時間間隔照射.



図 10: 1 秒間隔ゆらぎ/12 時間間隔照射



図 11: 1 秒間隔ゆらぎ/6 時間間隔照射

表1: 周波数に1/fゆらぎを組込んだ超音波照射実験の測定結果.

| 超音波条件 | 全体の重さ (g) | 100本の平均長 (mm) |
|----------------|-----------|---------------|
| 照射なし | 116.0 | 95.61 |
| 0.1秒ゆらぎ/連続 | 113.8 | 93.66 |
| 0.1秒ゆらぎ/12時間間隔 | 118.9 | 91.86 |
| 0.1秒ゆらぎ/6時間間隔 | 120.6 | 96.87 |
| 1秒ゆらぎ/12時間間隔 | 121.4 | 88.54 |
| 1秒ゆらぎ/6時間間隔 | 117.3 | 88.15 |

表2: 全体の重さ/平均長.

| 超音波条件 | 全体の重さ (g) / 平均長 (mm) |
|----------------|----------------------|
| 照射なし | 1.213 |
| 0.1秒ゆらぎ/連続 | 1.215 |
| 0.1秒ゆらぎ/12時間間隔 | 1.294 |
| 0.1秒ゆらぎ/6時間間隔 | 1.245 |
| 1秒ゆらぎ/12時間間隔 | 1.371 |
| 1秒ゆらぎ/6時間間隔 | 1.331 |

4. おわりに

本論文では、植物の生長促進を目的として、1/fゆらぎを組込んだ超音波がもやしの生長に与える影響を検証する実験を行った。超音波を照射することで、もやしの生長に違いを与えることができた。今後、太さや密度といった評価項目の追加や、評価方法を変えることで、超音波がもやしの生長に与える影響をより明確にして行く予定である。

参考文献

- [1] “統計情報:農林水産省.” <https://www.maff.go.jp/j/tokei/>.
- [2] 一般社団法人日本施設園芸協会, “大規模施設園芸・植物工場 実態調査・事例調査.” <https://jgha.com/wp-content/uploads/2023/03/TM06-04-bessatsu1.pdf>, 3 2023.
- [3] 齋藤徳勇棋, 安部泰雅, 山岸樹, 孔祥博, 熊木武志, “植物の生長促進を目的とした超音波照射システムの構築,” 電子情報通信学会研究技術報告, vol. 122, no. 141, pp. 26–31, 2022.
- [4] 杉崎太綱, 法橋 渉, 大森大輔, ムハンマド アナスビンノリザン, 原田知親, 小西 淳, 熊木武志, “超音波の実装による野菜への影響調査,” 日本生物環境工学会 2019 年千葉大会, 2019.
- [5] 井幡光詞, 原六蔵, 木村友則, 西岡康弘, 米田尚史, “超音波照射によるサツマイモ成長促進の要因検討 ~電気特性への影響~, ” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 2019.
- [6] 田辺公子, 脇坂智子, 保田昌秀, 志摩健介, 石川勝美, “植物の初期生育に与える水の影響 (第2報),” 植物工場学会誌, vol. 7, no. 4, pp. 185–190, 1995.
- [7] 山名昌男, 安部智子, 馬場嵩, 椿原賢太, 栗山昭, 大内幹夫, “ダイコンsprautの成長および抗酸化活性に与える超音波音圧の影響,” 植物環境工学, vol. 27, no. 2, pp. 91–96, 2015.
- [8] 武者利光, “ゆらぎの発想 ~1/fゆらぎの謎にせまる,” 1994.
- [9] “ヴァーストゥー — 1/fゆらぎ — 空間ヒーリング — ヒマラヤハウス.” <https://www.himalayahouse.co.jp/yuragi.html>.
- [10] 法橋 渉, 熊木武志, “1/fゆらぎに調光したLED光による植物育成の検討,” LSIとシステムのワークショップ 2018, 2018.
- [11] 杉崎太綱, 熊木武志, “超音波の実装による豆苗への影響調査,” LSIとシステムのワークショップ 2019, 2019.
- [12] 熊木武志, 法橋 渉, “植物生産方法及び光源システム.” 日本特許, 特願 2018-195232, 2018 年 10 月 16 日出願.
- [13] W. Hokkyo and T. Kumaki, “Verification of led lighting effects with 1/f fluctuation for plant growth,” International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC), 2018.
- [14] W. Hokkyo and T. Kumaki, “Effectiveness of plant growth under 1/f fluctuation led light based on photosynthetic photon flux density,” ISP International workshop on Nonlinear Circuit, computer and Signal Processing (NCSP), 2020.
- [15] “情報科学のあれこれ-複雑系(その11) 複雑適応系に対する種々の考察(1).” <http://www.joy-hi-ho.ne.jp/htsubono/home39.html>.
- [16] “Venetor Sound.” <http://venetor-sound.jugem.jp/?eid=73>.
- [17] “wavio PyPI.” <https://pypi.org/project/wavio/>.
- [18] “超音波でより速い発芽 - ヒールシャー超音波技術.” <https://www.hielscher.com/ja/faster-sprouting-with-ultrasonics.htm>.