

光刺激に対する磁性体吸収植物からの
磁気変動検出の試み

工学部 電気電子工学科

指導教員：柳橋 秀幸 講師

4EL1- 64 渡邊 駿太

4EL4- 29 高田 至

目次

第1章 緒言	1
1.1 研究背景と目的	1
1.2 論文構成	3
1.3 磁性流体について	4
1.4 供試植物について	5
第2章 磁気計測システム系の構築	6
2.1 目的	6
2.2 磁気計測系	6
(a) 磁気シールドルーム	7
(b) ヘルムホルツコイル	8
2.3 実験使用機器概要	9
2.3.1 LED パネル	9
2.3.2 光ファイバケーブル	10
2.3.3 試験管固定装置	11
2.4 設置方法	12
2.5 まとめ	13
第3章 赤色光と青色光の交互照射による光刺激を提示した際の生体電位計測 ..	14
3.1 目的	14
3.2 実験方法	14
3.3 実験結果と考察	14
3.4 まとめ	17
第4章 赤色光と青色光の交互照射による光刺激を提示した際の磁気計測	20
4.1 目的	20
4.2 実験方法	20
4.3 実験結果と考察	20
4.4 まとめ	22
第5章 紙を用いた磁性流体溶液の吸い上げ実験	23
5.1 目的	23
5.2 実験方法	23
5.3 実験結果と考察	24
5.4 まとめ	27
第6章 結言	28
参考文献	24
謝辞	25

第1章 緒言

1.1 研究背景と目的

近年、温暖化による異常気象や災害、農業における高齢化と人口減少により、作物の収穫量が不安定となっており、収穫量の安定化を目的とした植物工場が注目されている。従来、植物工場内の栽培環境調整はプログラム制御による単調な管理が主体であったが、関連技術の発展に伴い近年は生産対象から得られる生体情報を栽培環境にフィードバックして制御する SPA (Speaking Plant Approach : 生体との対話) が盛んに研究され、現場に導入されるようになった。

植物の生体情報には光合成量、クロロフィル蛍光、葉面や可食部の色や大きさ等が挙げられるが、これらは総じて生体生理活性に起因する「結果」であり、観測可能になるまで時間差が生じる。一方、生体電気信号は生体生理活性に伴う細胞イオン濃度変化に起因し、生体生理活性の一時的指標といえることから、供試体の状態をいち早く捉えることができる。しかしながら、現在の主な生体電気信号計測は供試体に直接ディスポ電極や針電極を接触させる必要があり、供試体の生育や信号自体に影響を及ぼすことや、供試体の成長により電極が脱落することが懸念され、長期間安定的に計測することが難しい。より効率的な植物の生育には生体生理活性のリアルタイムの計測が重要であると考えている。これらのことから、実用性や信頼性の高い SPA タイプの植物工場システムの実現に生体生理活性の非接触で間接的な計測の確立が重要である。

図 1.1 に本研究の概念図を示す。本研究の目的は、磁性流体を用いて植物の生体情報を非接触計測する新たな計測手法を確立することにある。供試植物にナノオーダー粒形の磁性流体を吸収させ、植物の生体生理活性によって生じる溶液輸送に伴って磁性位流体が移動する際に発生する微弱磁気変動を捉えることによって、非接触かつリアルタイムで植物生体生理活性を計測する。今年度は、磁性流体を吸収させた供試植物（以下、磁性植物）の葉面に光刺激を提示し、この時の磁性植物由来の磁気変動の計測を試みた。また、昨年度のデジタル顕微鏡による磁性植物観察の結果を踏まえ、各種サイズの磁性植物における各種部位を詳細に観察した。

研究成果は植物工場やライフサイエンスへの寄与だけでなく、医学への応用も期待できる。例えば磁気に着目した場合、SQUID 脳磁計は大がかりで高額な機器を特殊な環境下 (SQUID の場合は極低温) で運用する必要があり、導入のみで億単位の費用を要し、研究用などでしか導入されていない。SQUID が受動的に高感度で導入のみで億単位の費用を要し、磁気の観点から生体情報を得る一方、本研究の手法は生体情報の発信源に磁性流体で磁性を寄与することで、能動的に磁気を増幅した上で生体情報を得る。この場合、SQUID よりも安価で感度の劣る磁気センサでも計測システムを構築できる。

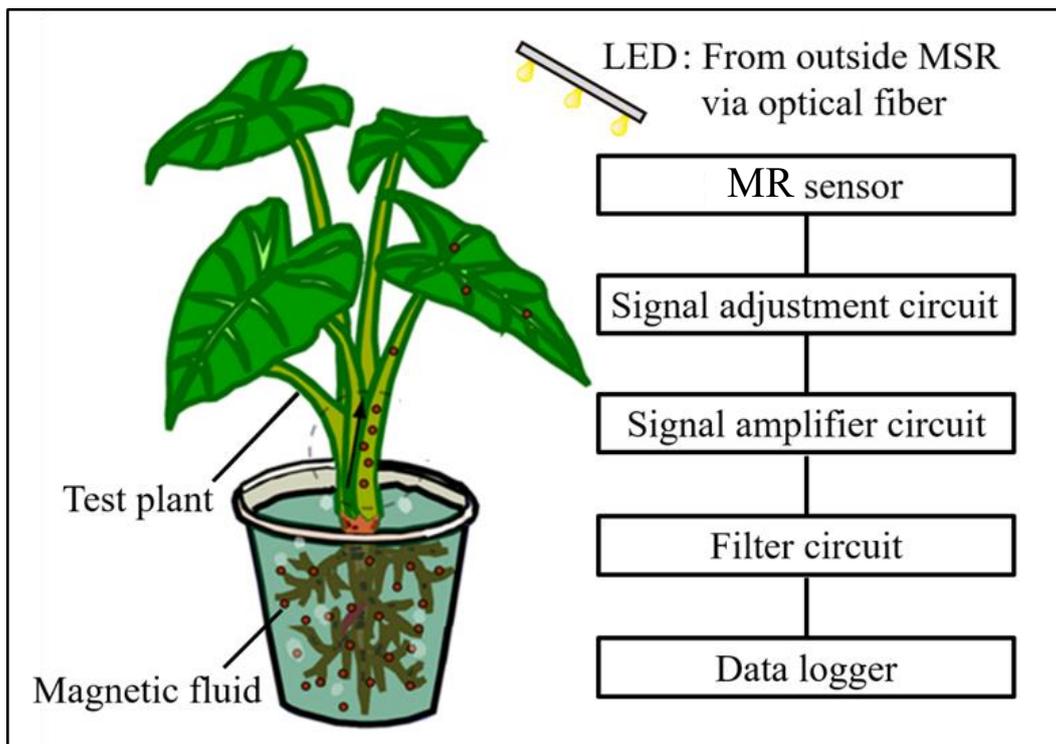


図 1.1 磁性流体を用いた植物生理活性の非接触計測の概念図

1.2 論文構成

図 1.2 に本論文の構成を示す。以下に本論文の構成を記載する。

本論文は 5 章の構成となり、1 章の緒言では研究背景、研究目的、磁性流体及び供試植物について述べる。

第 2 章では、磁気シールドルームでの磁気計測実験に向けたシステムの構築について述べる。

第 3 章では、インキュベータでの供試植物由来の生体電位応答の検出について述べる。

第 4 章では、磁気シールドルームでの磁性植物由来の生体電位応答と磁気変動の検出について述べる。

第 5 章では、磁気シールドルームでの紙を用いた磁性流体溶液の吸い上げにおける磁気変動の検出について述べる。

第 6 章では、緒言して本論文にて得られた成果を摘要し、今後の課題と展望について述べる。

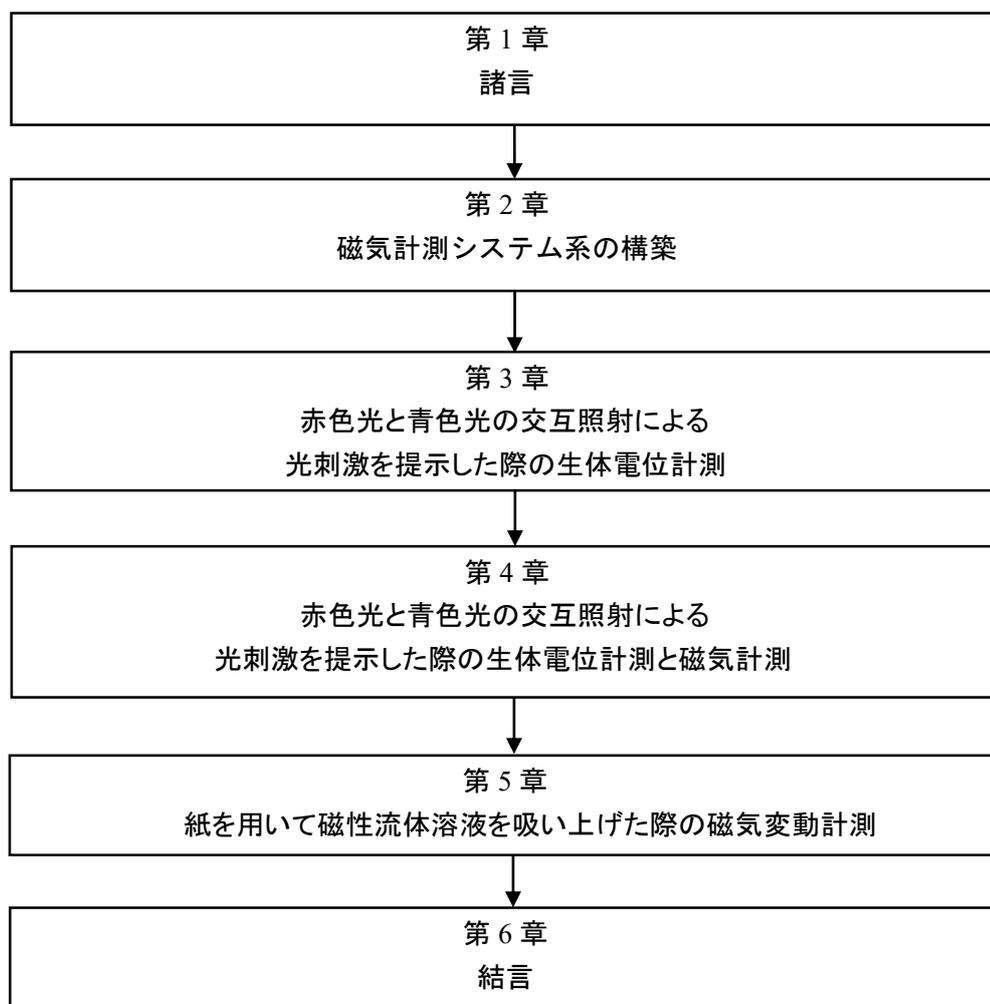


図 1.2 本論文の構成

1.3 磁性流体について

図 1.3 に磁性流体のモデルを示す。磁性流体とは、磁性を帯び、磁石などの磁気に反応する流体である。磁性流体はマグネタイトや複合フェライトなどの強磁性超微粒子、界面活性剤、水や油などのベース液の3つの成分から構成されている。直径 10 nm ほどの強磁性超微粒子のまわりには、粒子同士の凝集を防ぐための界面活性剤が被覆しており、ベース液中で安定な分散状態を保っている。

磁性流体は、スピーカ産業で普及している。磁性流体は空気の約 6 倍の熱伝導率を持っており、磁場中において磁性流体に非磁性体を入れると、非磁性体は磁場の弱い所へ押し出されるという特性を持っている。スピーカは永久磁石を用いるため、スピーカは常に磁場中に存在する。そのため、磁性流体の特性を用いることにより、ボイスコイルのセンターリングと、ダンピング効果を得ることができ、スピーカに磁性流体を用いることが一般化したり。また、近年は医療分野など様々な分野で応用されており、特に医療分野では耐熱性の低いがん細胞に付着させることで、患部にマイクロ波を照射した際により多くのエネルギーを吸収させることができ、がん細胞のみを選択的に加熱することができる。さらに、今後の展望として、磁性流体を用いて磁気変動を正確にとらえることが可能となれば、がん細胞の位置や大きさなどを正確に確認することが可能となり、がん細胞の摘出手術などの治療をより安全で迅速に行うことができるようになる。

本実験ではフェローテック社製の磁性流体、P-0801 を用いた。図 1.4 に P-0801 の磁性流体容器を示す。また、表 1.1 に P-0801 の特性を示す。磁性流体の溶媒は水である。

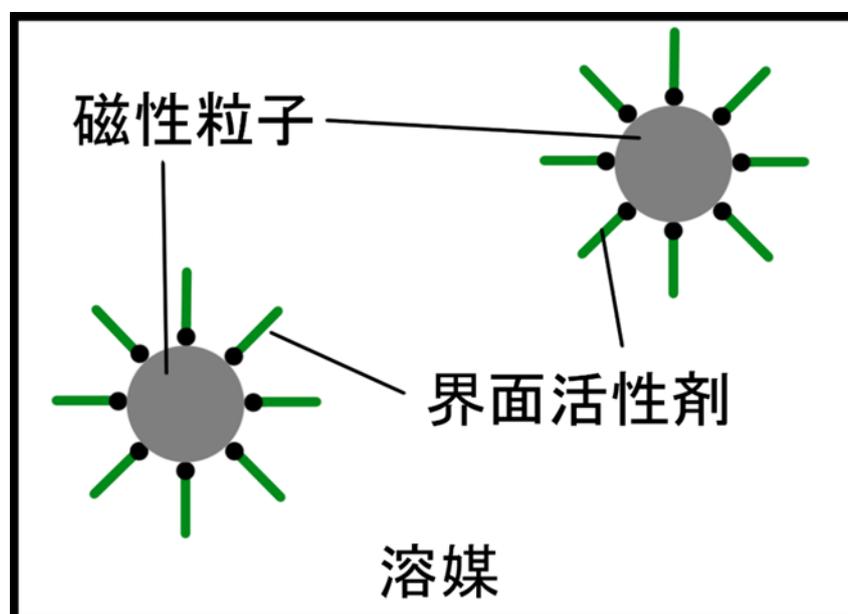


図 1.3 磁性流体のモデル

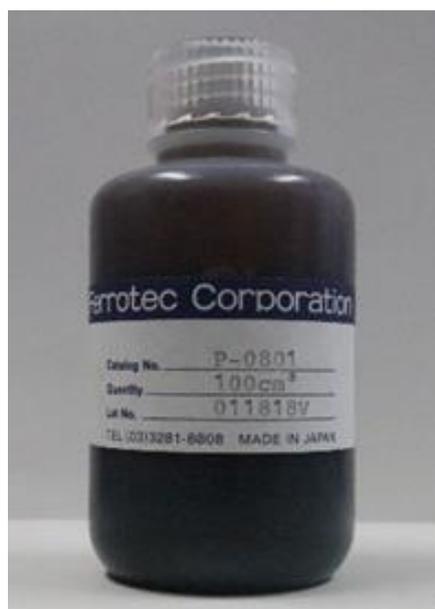


図 1.4 P-0801

表 1.1 磁性流体 P-0801 の特性

	CGS 単位系	SI 単位系
外観	黒褐色または赤褐色の液体	
分散材	水	
飽和磁化	66 G	6.6 mT
粘度 (27°C)	≦5 cp	≦5 mPa·s
密度 (25°C)	1.06 g/ml	1.06 g/cm ³
熱伝導率 (38°C)	約 600 mW/ (m·K)	約 600 mW/ (m·K)

1.4 供試植物について

本研究ではクワズイモを供試植物として実験を行う。クワズイモの選定理由として、水分吸収能力が高く、磁性流体溶液をより多く吸収可能であることが挙げられる。クワズイモはサトイモ科クワズイモ属の植物であり、観葉植物であるため入手が容易である。根茎で株分けが可能であるため、個体数を容易に増やすこともでき、室内で育成することから冬季でも実験可能である²⁾。また、昨年度までの研究結果より、水切りしたクワズイモは磁性流体を吸収することを確認し、赤色光照射時にクワズイモの生体生理活性を磁気変動としてとらえることに成功したため、クワズイモを供試植物とした。

第2章 磁気計測システム系の構築

2.1 目的

本章では、磁性植物由来の磁気変動をより正確に計測するための磁気計測システムを構築する。具体的には、磁気シールドルーム内での金属の使用を避けることにより、機器による磁気ノイズなどの磁気計測への影響を低減する。

2.2 磁気計測系

磁気検出系の構成を図 2.1 に示す。磁性流体由来の磁気は極微弱と考えられ、磁気雑音の遮断のためにシステムは本学先端電子技術応用研究所内の磁気シールドルームに設置した。この磁気シールドによって地磁気も遮断されることから、自作のヘルムホルツコイルによる任意の強度の静磁場中に磁性流体を置くことでこれを磁化した。ヘルムホルツコイルは中心部分に均一磁場を得ることが可能であり、定電流源からコイルに流れる電流を制御することで任意の磁場強度を得ることもできる。ヘルムホルツコイル中心部分に pT オーダの感度を常温において有する MR sensor (Magneto Resistive sensor, Nivio xMR sensor, TDK 社製) センサを配置して、検出信号はデータロガーにて記録した³⁾。本研究では後述のように供試植物に光刺激を提示するが、光源からの磁気雑音の影響を低減するため、シールド外部に設置した光源から光ファイバ経由でシールド内部に導光した。また、本実験にて用いた本学天池自然学苑内の先端電子技術応用研究所の磁気シールドルーム、ヘルムホルツコイルの詳細を記載する。

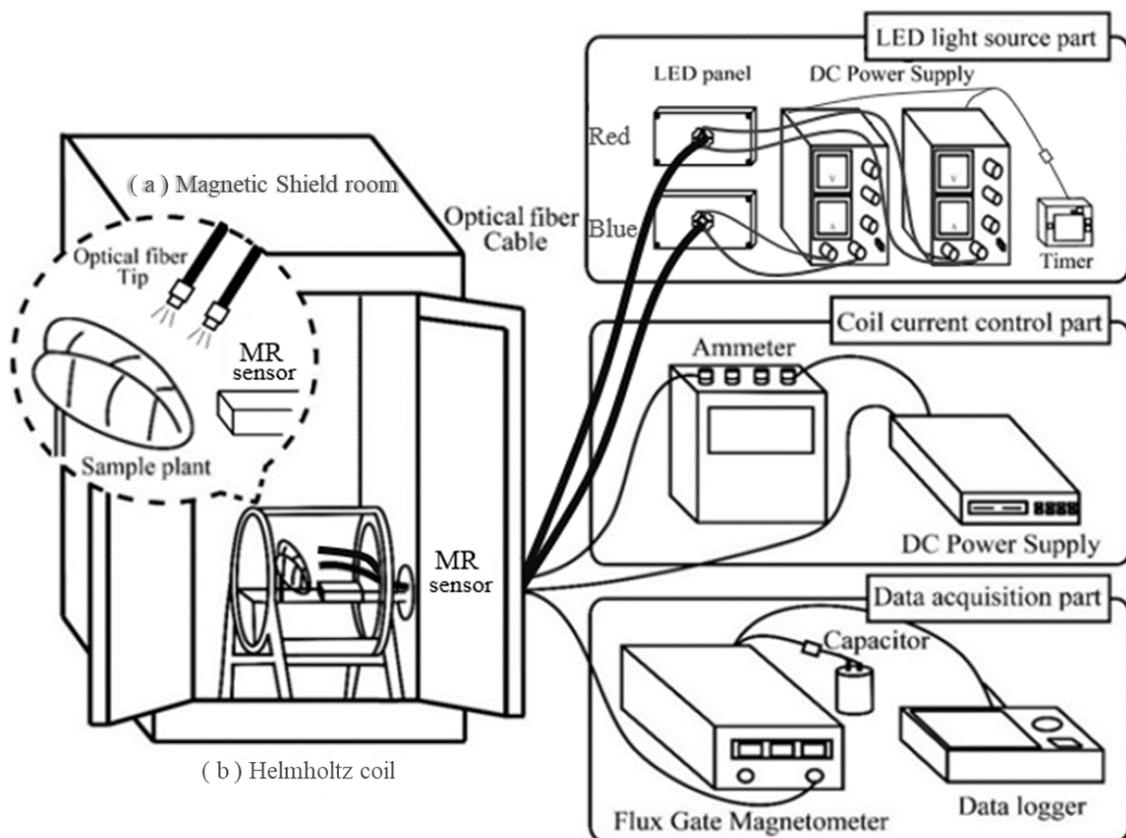


図 2.1 計測機器の全景

(a) 磁気シールドルーム

図 2.2 に天池自然学苑の磁気シールドルームを示す。この磁気シールドルームは地磁気遮断レベルの性能を有しており、外部からの磁気雑音を遮断しほぼ無磁場での計測が可能である。



図 2.2 磁気シールドルーム

(b) ヘルムホルツコイル

図 2.3 にヘルムホルツコイルを示す。ヘルムホルツコイルは同心円の平行に並んだ 2 つの同サイズ、同巻き数のコイルにより静磁場を発生させることができる。本実験で使用するヘルムホルツコイルは内径 66 cm で最大コイル巻き数は 30 回、最大許容電流は 15 A である。ただし、コイルの収まりに余裕を持たせるため巻き数 24 回、電流値は 4 A で使用した。今回の実験で使用した際の磁場強度は約 260 A/m である。ヘルムホルツコイルの磁束密度は式 (2.1) によって求められる。



図 2.3 ヘルムホルツコイル

$$B = \left(\frac{4}{5} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 n I}{R}$$

ここで、 B は磁束密度 [wbm^{-2}], μ_0 は透磁率 [Hm^{-1}], n はコイルの巻き数 [回], I は印可電流 [A], R はコイルの半径 [m] とする。

2.3 実験使用機器概要

2.3.1 LED パネル

図 2.4 に本実験に用いた LED パネルを示す。また、実験には赤色光と青色光の 2 つのパネルを用いた。

赤色パワーLED は、OPTOSUPPLY 社製の放熱基盤付 3 W 赤色パワーLED (中心発光波長 625 nm) である。赤色パワーLED を用いた理由は、植物が光合成を行う際に使う光は、可視光線の中でも長波長の赤色光であるためである。

青色パワーLED は、OPTOSUPPLY 社製の放熱基盤付 3 W 青色パワーLED (中心発光波長 470 nm) である。青色パワーLED を用いた理由は、植物の CO_2 取り込みや蒸散をするための気孔が青色光によって駆動するためである。

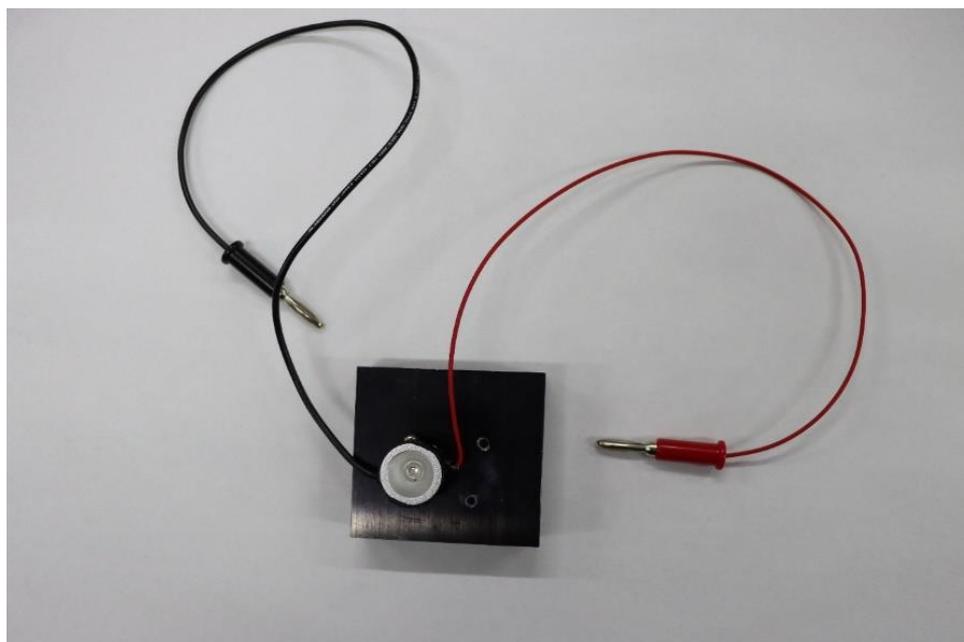


図 2.4 LED パネル

2.3.2 光ファイバケーブル

図 2.5 に本実験で用いた光ファイバケーブルを示す。本実験に用いた光ファイバケーブルは住田光学ガラス社製のストレートライトガイドである。ライトガイドに使用されている光ファイバは、二重構造になっており、芯材（コア）に優れた透過特性を持つ光学ガラス、その外側に被覆材（クラッド）として対候性の優れたガラスで構成されており、一端から入射した光はコア内の界面で全反射を繰り返しながら他端へと伝送される⁴⁾。光源装置と組み合わせることでノイズのない、無熱で高輝度な照明を実現した。また、光ファイバケーブルには次のような特徴がある。非常に細いガラス繊維でできているため柔軟に曲げることが可能であり、装置内の取り回しなども容易であること。ガラス製のため、断面耐熱が 350 °C という耐熱性があること。ガラス製のため、電気ノイズの影響を受けにくく電気の発生もないということ。



図 2.5 光ファイバケーブル

2.3.3 試験管固定装置

図 2.6 に昨年度製作した試験管固定装置を示す。磁気シールドルーム内に金属製品など磁性を持つものは持ち込むことができないため、全て非磁性の部品を用いた。骨組みには木材を使用し、接着には木工用ボンドと竹釘を用いた。丸棒の挿す位置を変えることで、高さ調整が可能である。結束バンドで固定することで、試験管が転倒及び振動による試験管の移動を防いだ。また、図 2.7 に供試植物を固定した様子を示す。

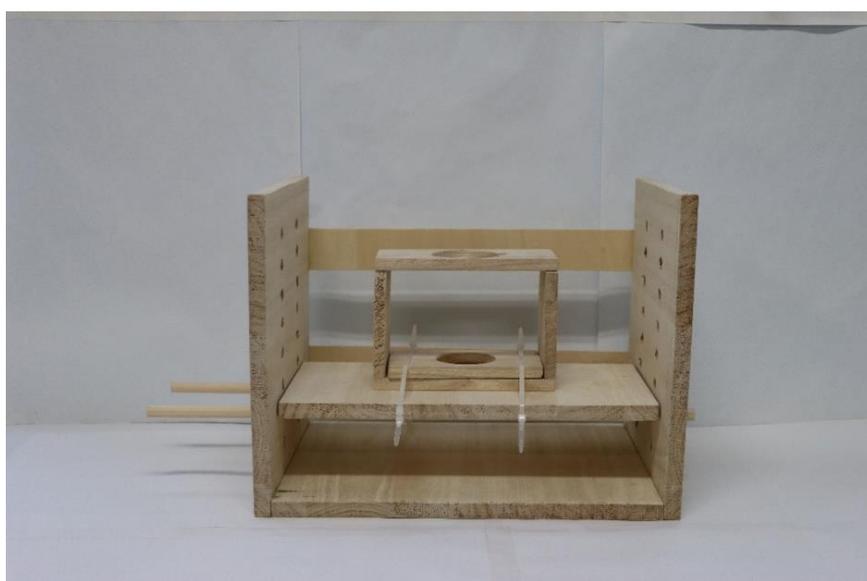


図 2.6 試験管固定装置



図 2.7 供試植物を固定した様子

2.4 設置方法

本実験ではヘルムホルツコイル中心部に置かれた磁性植物葉面に光刺激を提示するが、光源からの磁気ノイズの低減のため、磁気シールドルーム外部に光源を設置し光ファイバケーブル経由でシールド内に導光した。磁気シールドルーム内には、ヘルムホルツコイルと磁性植物、MR センサヘッドのみとし、磁気計測機器は全て磁気シールドルーム外に設置した。また、磁気計測機器が微弱な振動によって生じる磁気ノイズを防ぐために、磁気シールド内で養生テープ、塩化ビニル管等を用いて固定を行った。磁性植物に光を提示している様子を図 2.8 に示す。

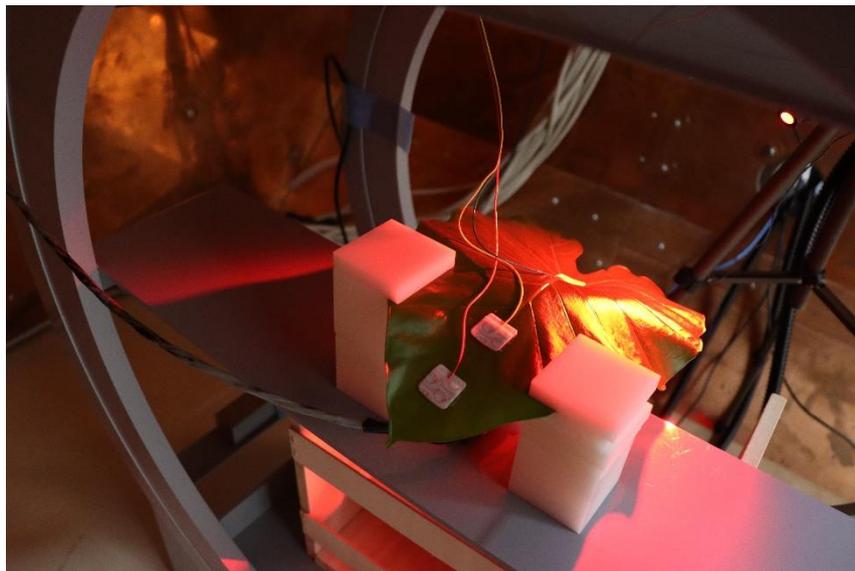


図 2.8 光刺激提示時の様子

2.5 まとめ

本章では、磁気計測実験に向けて本年度新たに構築した磁気計測機器の仕様およびシステムの概要について記載した。磁気計測実験をするにあたって、計測データに影響を与える磁気ノイズの低減方法が一番の課題であり、磁気ノイズ低減を目的としたシステムの構築を行った。供試植物に光刺激提示するために、光ファイバケーブルを使用することで、光強度を高めることに成功し、磁気ノイズを低減させた計測を行うことが可能となった。磁気シールドルーム内には、ヘルムホルツコイルと磁性植物、MR センサのみとし、磁気計測機器は全て磁気シールドルーム外に設置した。また、磁気計測機器が微弱な振動によって生じる磁気ノイズを防ぐために、磁気シールド内で養生テープ、塩ビ管等を用いて固定を行った。磁気計測を行う際には、タイマーを用いて光源の明滅を管理したことにより、無人で長期的な計測が可能であるとともに人の出入りによる磁気ノイズを最小限に抑えることに成功した。

第3章 赤色光と青色光の交互照射による光刺激を提示した際の生体電位計測

3.1 目的

昨年度は、赤色光を30分間隔で明滅させ、この光刺激を提示した場合の植物由来の磁気応答を計測することに成功した。近年、多くの植物工場では赤色光と青色光の2色の光源を用いているため、本年度は赤色光と青色光による磁気応答を調べることにした。しかしながら、赤色光と青色光の交互照射による生体電位応答に関するデータがなく、磁性植物がヘルムホルツコイルによる影響を受けるのかも確認されていなかった。そのため、本章では磁気応答計測の予備実験として赤色光と青色光の光源による光刺激を交互照射した際の生体電位を計測することを目的とした。

3.2 実験方法

供試植物にはクワズイモを用い、実験計測中は水切りしたクワズイモの茎部から濃度1%の磁性流体P-0801溶液を吸収させた。生体電位は差動型増幅器(CMRR:120dB以上、S/N:80dB)により増幅し、電極には心電図観察のための医療用のディスポ電極を用いた。光源には、中心波長625nmの赤色パワーLEDと中心波長470nmの青色パワーLEDを用いた。クワズイモは実験開始前に蒸留水を1時間前後吸わせたものを使用し、クワズイモの動きの抑制や、水面からの蒸発を防ぐためにテープで試験管と茎部を固定した。インキュベータ内部では、2本の光ファイバケーブルから葉の先端部分に、赤色光と青色光が赤色光→暗転→青色光→暗転を30分間隔で繰り返すように設定して照射した。さらに、照度計を用いて、光ファイバケーブルから照射される光の強度を 18 W m^{-2} に調節した。また、図2.8のように、葉の表面にディスポ電極を取り付け、データロガーを用いて生体電位の計測を行った。なお、葉の先端に光を照射する理由としては、これまでの実験より、葉の先端部分の方が、生体電位の応答が正確に把握できたためである。また、実験期間は5日間とした。

3.3 実験結果と考察

供試植物葉面に光刺激を提示した際の生体電位応答を図3.1～図3.5に示す。図より、生体電位はほとんどが周期的な変化を示しており、それは赤色光と青色光の明滅に応答していることが確認できた。また、実験開始直後は、光源の明滅に応答した生体電位応答は確認できなかったため、図における周期的な生体電位応答は植物由来のものであると考えられる。

赤色光と青色光のそれぞれの場合における生体電位応答を比較すると、初めは赤色光における生体電位応答の方が青色光における生体電位応答より大きな電位変化をしていたが、図3.4の丸印部分以降は青色光における生体電位応答の方が大きな電位変化をしている。これは、青色光には細胞内外のイオン交換を活発化する働きがあるため⁹⁾であると考えられる。また、光の照射中では、図示のように、赤色光の生体電位が減少→増加である場合が多いが、青色光に対する生体電位は減少→増加→減少→増加である場合が多い。供試植物体内において光の周波数ごとに光受容体が異なり、青色光の光受容体の方が赤色光の光受容体の方が、反応速度が早いこと⁹⁾が確認されている。これにより、青色光における生体電位応答は30分の中に複数回電位のピークが確認できる結果となったと考えられる。ま

た、本実験に用いた赤色光と青色光の2色の光刺激には、供試植物に対してそれぞれ異なる働きを持っていることが確認されている。それは、赤色光には光合成を促進し、青色光には蒸散などを行うための気孔を刺激するという働きである⁷⁾。したがって、本実験において計測された生体電位は、赤色光と青色光で異なる生体生理活性を捉えていたと推察できる。

本実験では、供試植物が赤色光と青色光の2色の光刺激に生体電位応答を示すことが確認できたが、植物工場では赤色光と青色光の光強度が3:1となるように照射されているため、光強度の調節をすることでより大きな生体電位応答が得られる光強度や異なる光による光強度の割合を探っていく必要がある。

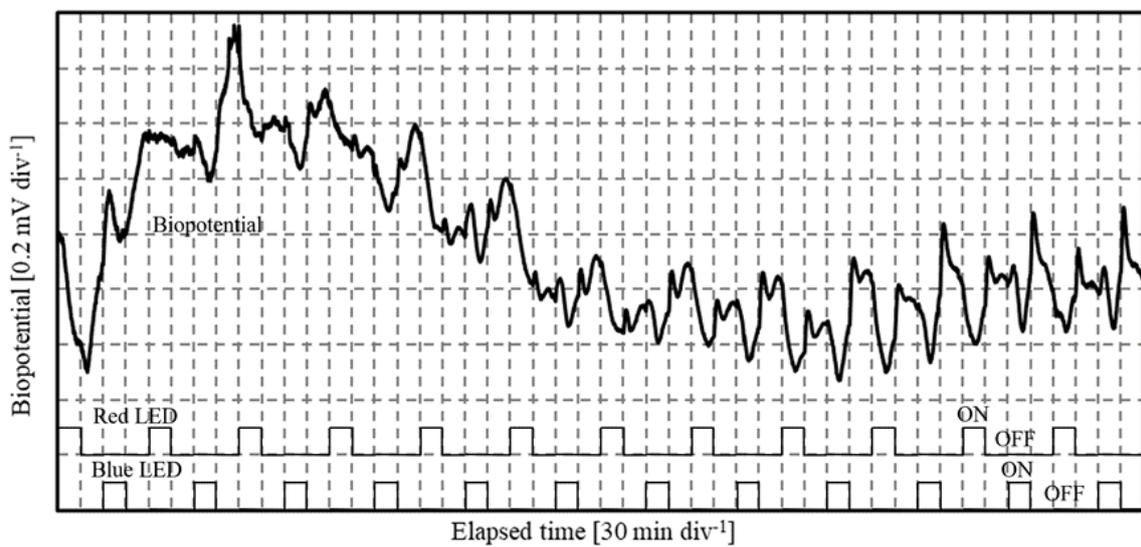


図 3.1 1 日目の赤色光と青色光の交互照射による生体電位応答

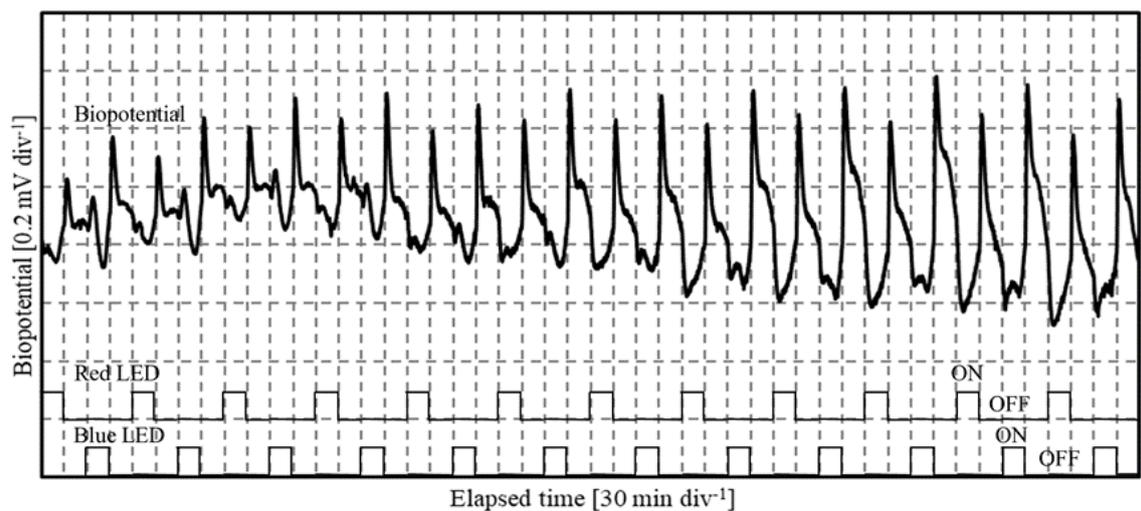


図 3.2 2 日目の赤色光と青色光の交互照射による生体電位応答

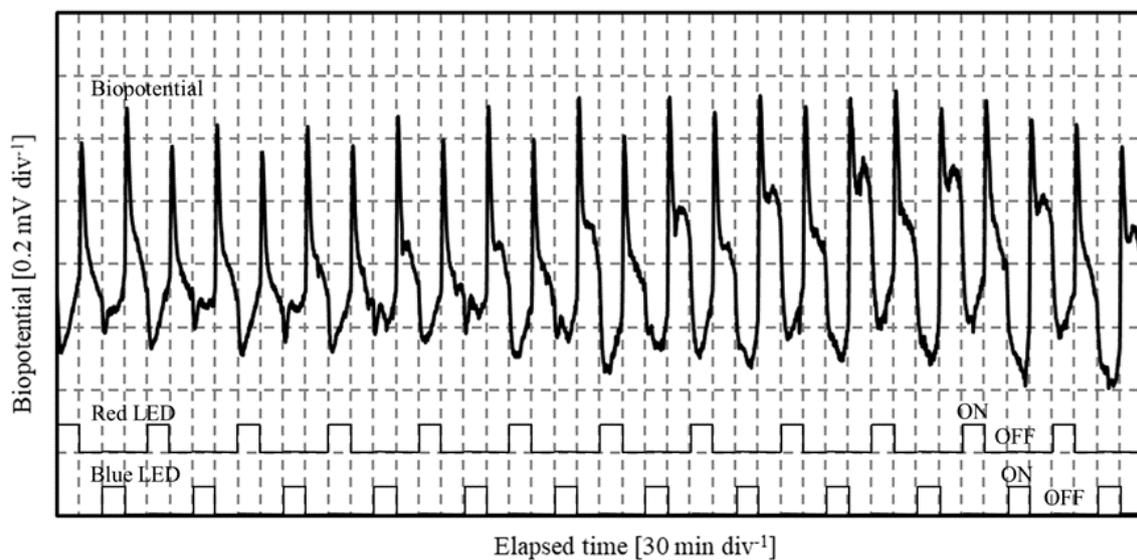


図 3.3 3 日目の赤色光と青色光の交互照射による生体電位応答

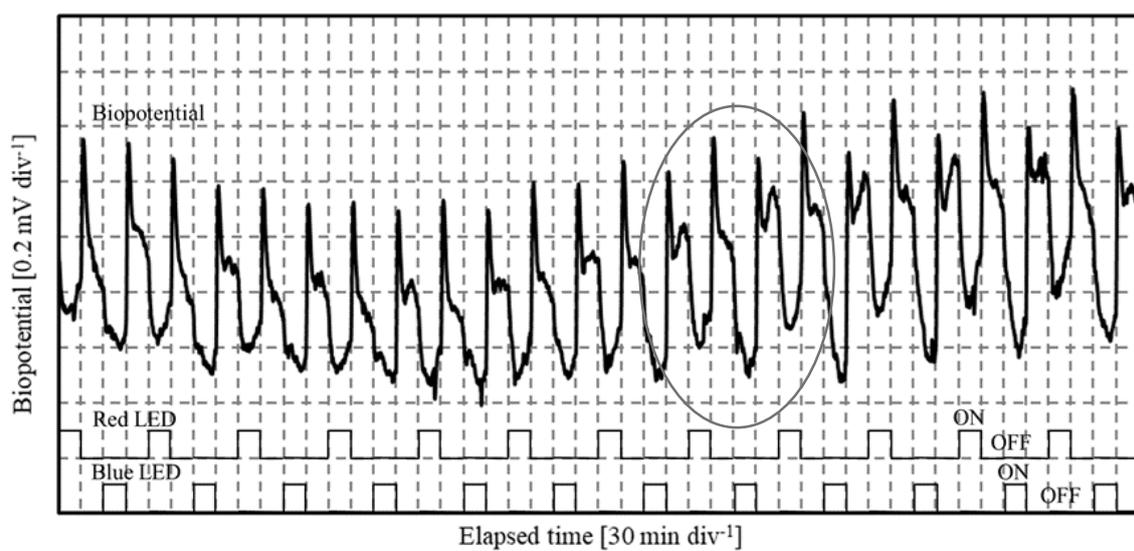


図 3.4 4 日目の赤色光と青色光の交互照射による生体電位応答

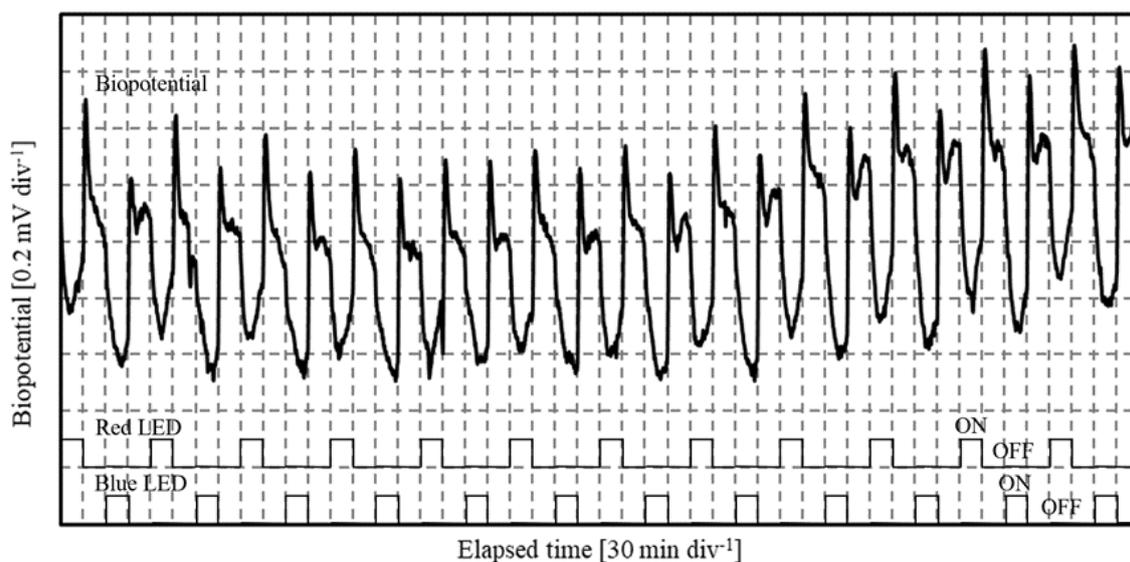


図 3.5 5日目の赤色光と青色光の交互照射による生体電位応答

3.4 まとめ

本章では赤色光と青色光の明滅による光刺激の提示に伴う植物由来の生体電位応答を観測した。赤色光と青色光のそれぞれの光刺激における生体電位応答は異なる変異の仕方をしており、これはそれぞれの光が植物に異なる働きを持っているためであると考えられる。したがって、今後は試行回数を増やし、生体電位応答が安定し、同一の周期を示すようになる時間を模索するとともに、光源の種類ごと、または、経過時間ごとにどのような生体電位応答を示すのかを調査する必要がある。

第4章 赤色光と青色光の交互照射による光刺激を提示した際の磁気計測

4.1 目的

本研究では、磁性流体を利用した植物の生体情報の非接触計測法の確立を目指す。具体的には、植物供試体内にナノオーダーの粒径の磁性流体を吸収させ、この磁性流体が生体生理活性に伴い供試体内を移動する際に生じる微弱磁気変動を捉えることで、間接的に生体生理活性を非接触でリアルタイム計測する。また、磁性流体溶液を吸収させた供試植物葉面に光刺激を提示した際の、磁気変動と生体生理活性との相関性を評価することを目的とし、磁気シールドルーム内で光刺激に対する磁性植物由来の磁気検出に取り組んだ。

4.2 実験方法

供試植物にはクワズイモを用い、実験計測中は水切りしたクワズイモの茎部から濃度1%の磁性流体 P-0801 溶液を吸収させた。生体電位は差動型増幅器 (CMRR:120 dB 以上, S/N:80 dB) により増幅し、電極には心電図観察のための医療用のディスプレイ電極を用いた。光源には、中心波長 625 nm の赤色パワーLED と中心波長 470 nm の青色パワーLED を用いた。クワズイモは実験開始前に蒸留水を1時間前後吸わせたものであり、クワズイモの動きを抑制し、水面からの蒸発を防ぐためにテープで試験管と茎部を固定した。葉面はブロックを用い、2か所固定した。その様子を図 3.3 に示す。インキュベータ内部では、2本の光ファイバケーブルから葉の先端部分に、赤色光と青色光が赤色光→暗転→青色光→暗転を30分間隔で繰り返すように設定して照射した。さらに、照度計を用いて光ファイバケーブルから照射される光の強度を 18 W m^{-2} に調節した。なお、葉の先端に光を照射する理由としては、過去の実験より、葉の先端部分の方が、生体電位の応答が正確に把握できたためである。また、計測期間は2日とした。

4.3 実験結果と考察

磁性流体溶液を吸収させた供試植物葉面に光刺激を提示した際の生体電位応答と磁気応答を図 4.1 に示す。また、図 4.1 における丸部分を拡大した図を図 4.2 に示す。図示のように、光源の明滅に伴う生体電位応答や、光源ごとの磁気応答が認められた。図 4.1 における矢印で示した位置以降では、周期的な応答が磁性植物由来のものか、機械的なものかを調べるために、光ファイバケーブルの先端をアルミホイルで多い、磁性植物葉面に対する光源の明滅の提示を停止した。光源の明滅に関係なく周期的な生体電位および磁気変動の停止が認められた。これにより、周期的な生体電位および磁気の変動は機械的な応答ではなく、磁性植物由来のものであると考えられる。また、この結果から、磁気変動は生体電位に関係するという事も確認できる。

生体電位応答は赤色光の ON 時に低下し、OFF 時は上昇している。さらに、青色光の ON 直後は上昇し、その後は下降している。そして、OFF 時には上昇したのち、1度少し下降してから再び上昇している。これにより、磁性植物は赤色光と青色光の2色の光源に応答し、生体生理活性をしていたことが確認できた。3章の実験結果と比較すると、類似した生体電位応答を示しているため、磁性植物は磁気シールドルーム内でヘルムホルツコイルによる静磁場の影響を受けにくいことが確認できた。

磁気応答は赤色光の明滅のタイミングでほとんど変化しておらず、赤色光に全く応答し

ていない箇所も確認できた。また、青色光を提示している途中でトレンドが変化したことも確認できた。しかしながら、生体電位応答は2色の光源に対して応答を示していたため、磁性植物は赤色光の光刺激にも生体生理活性をしていたが確認できた。これは、第3章でも述べたように赤色光は光合成を促進し、青色光には蒸散などに関係する気孔を刺激する働きがあるため、赤色光では磁性流体がほとんど移動しなかったと推察される。また、本実験では、磁性植物葉面で生体電位を計測し、磁気センサを用いて磁性植物茎部における磁気変動を計測していた。そのため、生体電位応答は葉面における生体生理活性を、磁気センサは磁性植物茎部における磁気変動を検出していたものである。したがって赤色光による光刺激にほとんど応答せず、青色光による光刺激による応答が容易に認められたのは、赤色光における生体生理活性が磁性流体溶液をそれ程吸い上げなかったが、青色光では蒸散が盛んにおこなわれ、磁性流体溶液を多く吸い上げた結果によるものであると推察される。

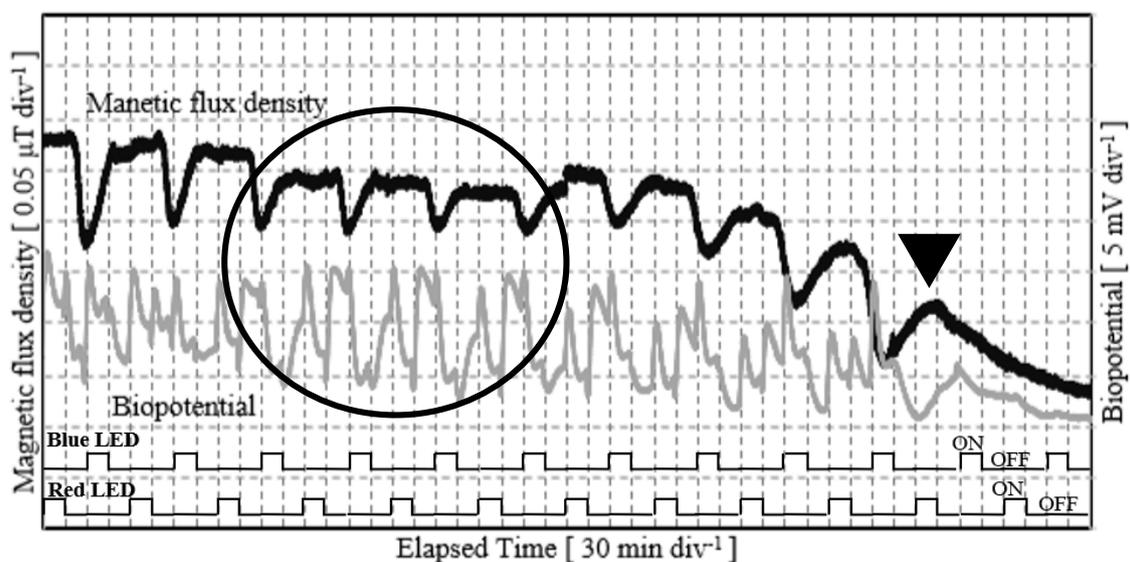


図 4.1 光刺激による磁性植物の生体電位応答と磁気応答

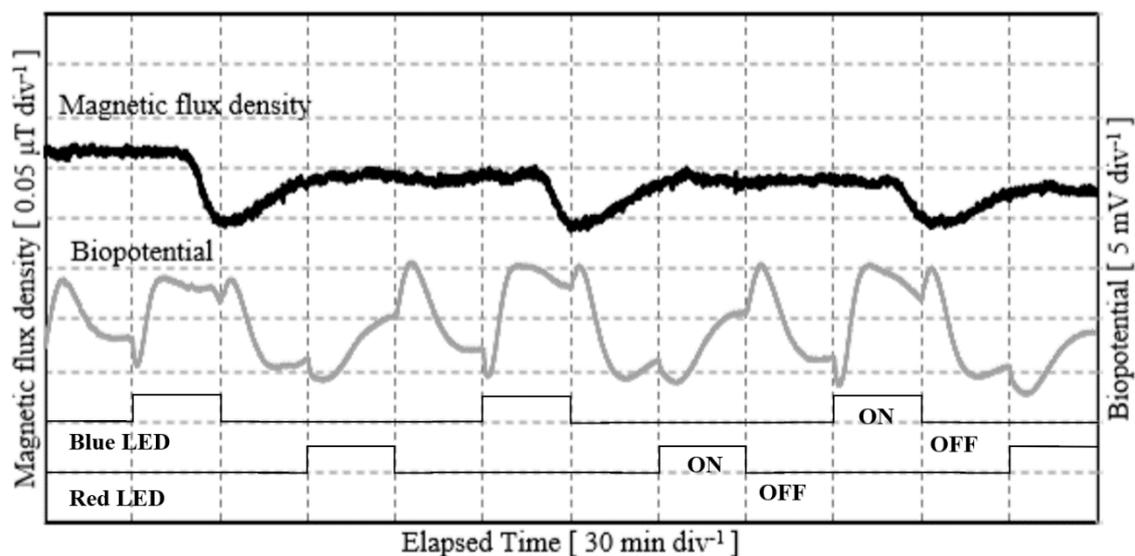


図 4.2 図 4.1 における丸部分の拡大図

4.4 まとめ

本章では、赤色光と青色光の明滅に伴う磁性植物由来の磁気応答を観測することに成功した。供試体内に磁性流体を吸収させることで、生体生理活性に関係する体内の溶液輸送に乗じて磁性流体が移動し、この際に極微弱な磁気変動が生じたと見込まれた。したがって、この磁気変動は生体生理活性に関係があるため、本実験により青色光による光刺激に対する磁気応答を計測できることが確認できた。つまり、部分的ではあるが磁気を介した生理活性の非接触計測すなわち間接的な生体電位計測の非接触計測が可能である。しかしながら、磁性植物内部において磁性流体の移動が起きない生体生理活性、すなわち磁性流体を吸い上げない生体生理活性を磁気変動により計測することはできないと考えられ、計測可能な生体生理活性の種類を確定させることはできなかった。そのため、今後は供試植物体内における生体生理活性がどのような磁気変動に対応するのかを調査し、どのような生体生理活性が磁気を介した非接触計測法で計測可能であるのかを例数を増加させて再現性を高めていくとともに、磁気ノイズの原因を調査していく。

第5章 紙を用いた磁性流体溶液の吸い上げ実験

5.1 目的

本年度や昨年度までの磁性植物に光刺激を提示した際の磁気検出実験において、図 5.1 に示すように、実験開始直後から一定方向の磁気変動トレンドが確認された。しかし、これまでは磁気変動と磁性流体の移動の関係性を明確にできていなかった。そのため、計測された一定方向の磁気トレンドが磁性流体の移動に起因するものかを調べるために、植物が磁性流体を吸い上げる様子を視覚化できるように準備した紙のモデルを用いて、磁性流体溶液を吸い上げさせ、その際の磁気変動を計測した。

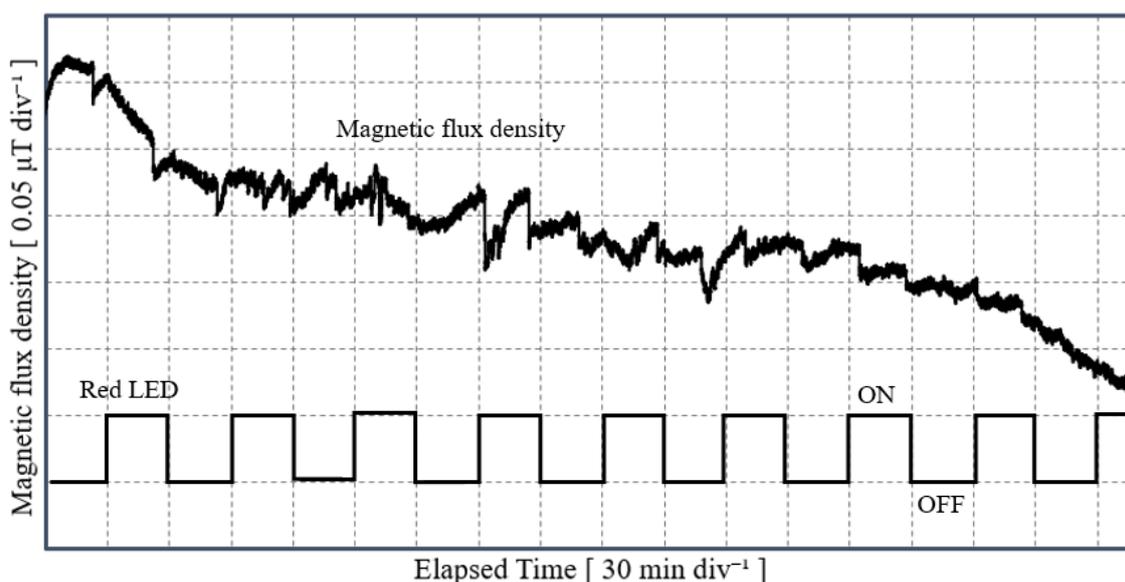


図 5.1 磁気変動トレンドの例

5.2 実験方法

磁性流体溶液は濃度が 1 % のものを 15 mL 用意した。紙はキッチンペーパーを用い、長さが約 30 cm、幅が約 1 cm となるよう切り取ったものを 1 枚用意した。その後、紙の下端をプラスチックコップの底にテープで固定し、上端は実験器具水平面から垂直に吊下げた。設置した紙の全体を蒸留水で濡らした後、コップの中に磁性流体溶液を注ぎ、コップの底から高さ約 15 cm と約 25 cm の 2 か所に磁気センサを設置して計測を開始した。また、実験の様子を赤外線カメラにて定点観測している。実験開始直前の様子を図 5.2 に示す。

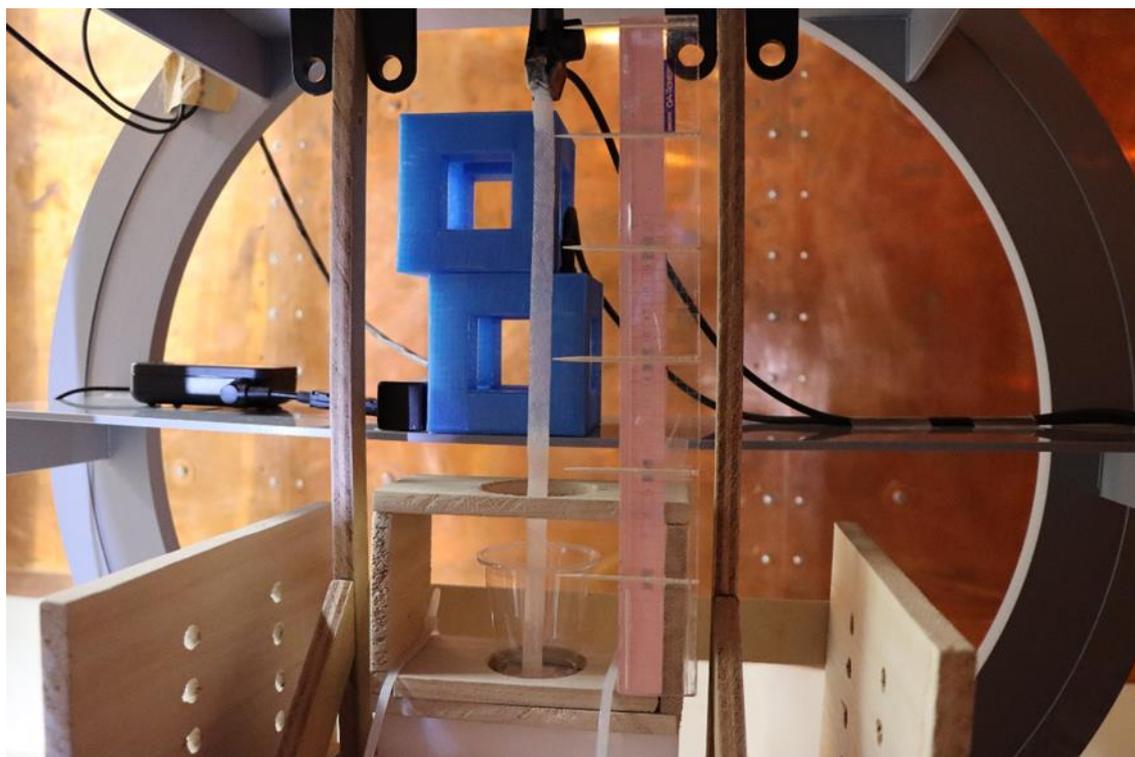


図 5.2 実験開始直前の設置された紙の様子

5.3 実験結果と考察

磁性流体溶液を吸い上げている紙における磁気変動を図 5.3 に示す。図中の High position は高さ約 25 cm の磁気センサ，Low position は高さ約 15 cm の磁気センサで計測した結果を示している。磁気センサ実験開始から数十分後からは，下降トレンドとなっており，High position の方が Low position より大きな磁気変動が認められた。これは磁性流体の移動距離が磁気変動の大きさが比例するためである。また，下降トレンドになった後から約 2 時間後まではなめらかな下降曲線を描いており，磁性流体溶液をおおよそ一定の速度で吸い上げていることが分かる。実験開始後 2 時間を過ぎたあたりで磁気変動の乱れが観測された。定点カメラの映像では，一定の速度で続いていた磁性流体の吸い上げがこの時間で停止しており，以降は緩やかな下降トレンドとなっている。この結果から，磁性植物を用いた実験における一定の磁気変動のトレンドは磁性流体の移動に起因するものであると確認できた。また，磁性流体溶液が上昇しているとき，磁気変動は下降トレンドを示すということも確認できた。しかしながら，磁性流体溶液を紙の上端まで吸い上げることはできず，約 18 cm しか吸い上げることができず，磁気センサで計測している 15 cm からあまり吸い上げることができなかった。そこで，磁性流体溶液をより高く吸い上げるために，以下の方法を考え，実験した。

磁性流体溶液は濃度が 1 % のものを 15 mL 用意した。紙はキッチンペーパーを用い，長さが約 30 cm，幅が約 1 cm となるよう切り取ったものを 2 枚用意し，ステープラとテープで紙の端をつなぎ，長さを伸ばした。その後，紙の下端を容量が 110 mL のプラスチックコップの底にテープで固定し，上端は実験器具に直接触れないよう，テープで巻き，水平面か

ら垂直に設置した。このときの様子を図 5.4 に示す。また、実験開始時にスポイトを用いて蒸留水で紙の全体を濡らし、プラスチックコップの中に磁性流体溶液を注いだ後、高さ 25 cm までをラップで囲った。ラップで囲う理由は、実験における供試植物は葉と茎を用いており、紙を葉部と茎部に分けて考えるためである。植物における蒸散のほとんどは葉部から行われており、茎部からはほとんど蒸散しない。そのため、紙をある程度ラップで囲うことにより、ラップで囲われた部分からの水の蒸発を制限し、茎部を再現できる。また、ラップで囲われていない部分からは水の蒸発が制限されないため、これにより供試植物の葉部を再現できる。ラップで囲った後すぐに、あらかじめ用意しておいた水溶液を、紙を固定したプラスチックコップに入れ実験を開始した。

実験終了時の様子を図 5.5 に示す。紙はラップで囲った上端近くまで吸い上げており、紙を用いて植物を再現し、磁性流体溶液を葉部まで吸い上げさせることができた。紙をラップで囲わずに、紙の角度や湿度を変化させた実験ではいずれも約 18 cm 吸い上げることしかできなかった。このことから、毛細管現象や浸透圧より、凝集力を用いた方が磁性流体溶液をより高く吸い上げることができ、実験で用いる供試植物の高さを考慮した場合からも、供試植物内部で磁性流体溶液を吸い上げるときには凝集力が働いていると考えられる。また、ラップで囲う高さを高くして実験を行った場合にも、磁性流体溶液はラップで囲った部分の上端近くまで吸い上げることに成功した。上端まで吸い上げることができなかった原因としては、実験中に密閉に使用したラップの上端が開いてしまい、紙の先端に近い部分が乾燥したため、磁性流体溶液の吸い上げがラップ内部で停止したためと考えられる。したがって、ラップの上端はできる限り狭くし、ラップ内部からの蒸発を防ぐ必要があると考えた。但し、ラップで囲う部分の長さを変化させた場合も、吸い上げた高さが上昇したため、実験方法の考え方は正確であったと推察した。そのため、今後は、ラップの固定方法の改善、または、ラップではなくサイズの合った筒（硬質ポリ塩化ビニル管など）を用意し、上端をテープやラップなどで密閉するなどの対策を行い、磁気変動を計測する必要がある。

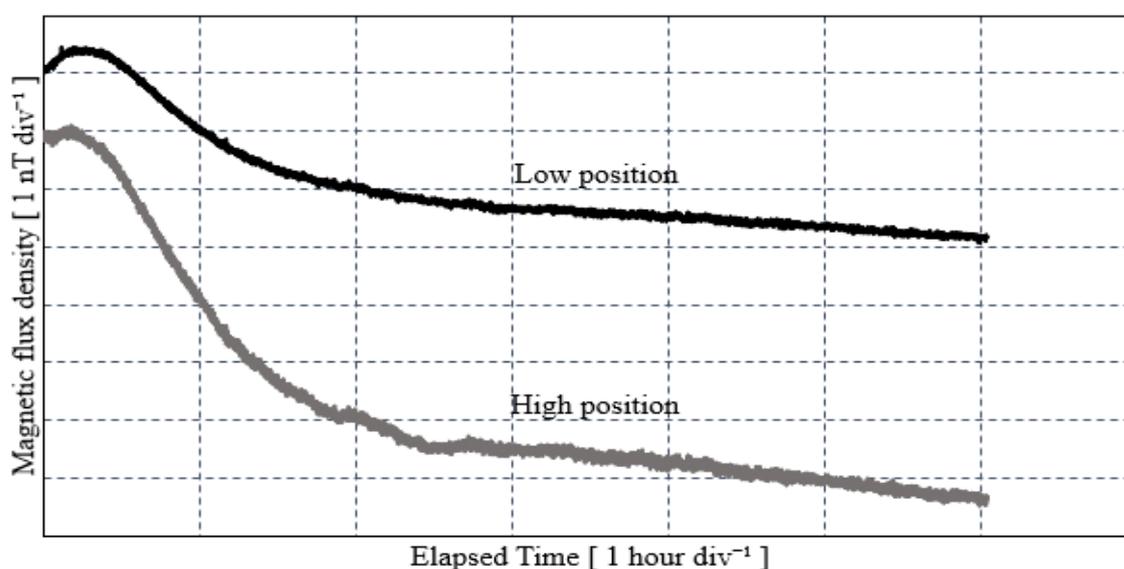


図 5.3 高さの異なる 2 か所で計測された磁気変動



図 5.4 ラップで囲った際の実験開始直前の様子



図 5.5 ラップで紙の下端から約 25 cm まで囲った際の実験終了時の様子

5.4 まとめ

本章では、紙を用いて磁性流体溶液の移動に伴う磁気変動を計測することにより、磁性植物を用いた実験における磁気変動が磁性流体の移動によるものであると明らかにするに至った。また、より植物の構造を模し、凝集力を用いることができる実験方法の考案もした。今後は本章で考案した実験方法を用いて例数を増やし、再現性を高めるとともに、吸い上げる方向を変え、磁性流体の移動方向と磁気変動の関係性をより明確にする必要がある。

第6章 結言

本研究では、磁性植物に光刺激を提示した際の磁気変動と生体生理活性との相関性の評価を目的として、光刺激に対する磁性植物由来の磁気検出を試みた。その結果、青色光の光源の明滅に伴う磁性植物由来の磁気応答を観測することに成功した。これは、供試体内に磁性流体を吸収させることで、生体生理活性に関係する体内の溶液輸送に乗じて磁性流体が移動し、この際に極微弱な磁気変動が生じたと見込まれた。また、赤色光の光源の明滅に伴う磁性植物由来の磁気応答はほとんど確認することができなかった。これは、青色光が気孔に働きかける光であり、蒸散により供試植物体内の水を循環させることができるということに対し、赤色光は供試植物体内の水を循環させる働きを持っていないことに由来する結果であると考えた。生体電位はこの生体生理活性と密接な関係にあり、磁気を介した生体生理活性の非接触計測すなわち間接的な生体電位計測の非接触計測は部分的に可能であると結論した。

また、磁性植物体内における磁性流体吸収による磁気変動について、昨年度までは磁性流体溶液の動きと磁気変動が結びついていなかった。これに対し、本年度は紙を用いて磁性流体溶液を吸い上げている際の磁気変動を計測することにより、磁性植物を用いた実験における磁気変動が磁性流体の移動によるものであると明らかにするに至った。

磁性流体を吸収させた供試植物の磁気検出では、今後試行回数を増加させ再現性を得るとともに、計測に最適な光源の明滅時間や磁気計測系における磁気ノイズ低減の方法を検討していく必要がある。また、植物工場では赤色光と青色光を同時照射していることから、今後は赤色光と青色光のそれぞれの照度を変化させ、同時照射した場合の磁気変動を計測する必要がある。

紙を用いた磁性流体溶液の吸い上げ実験では、第5章で考案した実験方法を用いて例数を増やし、再現性を高めるとともに、吸い上げる方向を変え、磁性流体の移動方向と磁気変動の関係性を正確にする必要がある。

参考文献

- (1) 株式会社モアテック：磁性流体とは？ - 株式会社モアテック - 磁気シール
(<https://www.moretec-inc.co.jp/about/magnetic-seals/98-cat01/321-2017-12-04-08-37-50>, 2021年12月16日)
- (2) 三田村 好矩：磁性流体の医療分野への応用
(https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe1986/72/7/72_7_834/_pdf, 2023年2月6日)
- (3) 高桑将太, 堀田陽介, 野屋孝太郎：「磁性流体を用いた植物生理活性の非接触計測に関する研究」, P.5, 2020
- (4) 株式会社住田光学ガラス：ライトガイド
(<https://www.sumita-opt.co.jp/ja/products/light-guide.html>, 2022年1月20日)
- (5) 松永晃磨, 柳橋秀幸, 平間淳司：磁性流体による植物体内への磁性付与と磁気検出の試み, 修士学位論文, pp8-20, 2020.
- (6) 長谷川 有貴, 安藤 毅, 勝部 昭明, 前川 仁：生体電位による光照射に対する植物生理活動の評価 (https://www.jstage.jst.go.jp/article/jacc/50/0/50_0_179/_pdf, 2022年2月8日)
- (7) 京都大学：青色光と二酸化炭素による気孔開閉運動を制御する分子機構の解明
(<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2017-12-05>, 2022年2月8日)

謝辞

本研究の実験および論文執筆にあたり，本学工学部電気電子工学科の柳橋秀幸講師からは多大なご助言と御指導を受け賜りました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

磁気シールドルームおよび実験スペースを提供してくださるとともに，数多くの貴重なご助言を賜りました本学先端電子技術応用研究所の所長である上原弦教授ならびに所員の河合涼教授，足立善昭教授，小山大介准教授，河端美樹研究員に厚く御礼申し上げます。

磁気計測全般に関して数多くの貴重なノウハウをお教えくださいました TDK 株式会社の寺園泰様と澁谷朝彦様をはじめ，皆様に厚く御礼申し上げます。

研究当初から論文作成に至るまで数々の助言と我々に寄り添い指導していただいた，本学大学院工学研究科電気電子専攻の樋谷友紀さん，吉良朋晃さんに厚く御礼申し上げます。

最後にともに研究を行ってきた柳橋研究室の皆様に御礼申し上げます。