

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K06322

研究課題名(和文) 磁性流体を用いた植物生体生理活性の非接触計測の試み

研究課題名(英文) Non-contact measurement of plant biological activity using magnetic fluid

研究代表者

柳橋 秀幸 (Yanagibashi, Hideyuki)

金沢工業大学・工学部・講師

研究者番号：10553208

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では植物の生体情報(生体生理活性)を非接触で計測する新規手法の確立を目的として、ナノオーダー粒径の磁性流体を供試植物体内に吸収させ、生体生理活性に乗じた供試植物体内での磁性流体の移動に起因する極微弱磁気変動の計測を試みた。取り組みの結果、まず、供試植物の茎部から吸収された磁性流体が葉部に到達し、植物内部から磁性付与できることを明らかにした。次に、磁性流体を吸収した供試植物の葉面に30分間隔の赤色光を提示したところ、光刺激に対する磁性植物由来の明確な磁気応答を捉えることに成功した。我々の調査の限り、両者ともに世界初の成果であり、磁気を介した生体情報の非接触計測が可能であると結論した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、植物の生体電気信号計測には接触式電極が用いられ、測定対象の成長や信号そのものに影響を及ぼす懸念があったが、今回実証された非接触計測手法はこの問題の解決に寄与すると考えられる。また、当該手法は植物に留まらず生物全般に適用可能であり、生体情報の非接触計測の有力な選択肢となり得る。また、当該手法は医療分野での技術革新にも寄与すると考えられる。脳波、心電、筋電などヒト部位の活動により得られる生体情報が重要となるが、これらを安価で簡易に非接触計測する方法は乏しい。生体に対して無害になるよう磁性流体粒子を被覆し、溶液も同様に工夫することで医療計測への応用も見込まれ、本研究成果の意義や貢献度は大きい。

研究成果の概要(英文)：In this study, for the purpose of establishing a new non-contact measurement of plant biological activity, magnetic fluid having nano-order particle size was absorbed into sample plant and then extremely weak magnetic fluctuations caused by the movement of the magnetic fluid in the sample plant were measured.

As the results, it became clear that the magnetic fluid absorbed from the stem of the sample plant reaches the leaves and can be magnetized from the inside of plant. Next, when red LED light was irradiated at 30-minute intervals on the leaf surface of the sample plant that absorbed the magnetic fluid from their stem, we succeeded in capturing a clear magnetic response derived from the sample plant to the light stimulus.

As far as we investigated, both are the world's first experimental examples and results. Based on these results, it was concluded that non-contact measurement of plant biometric information via magnetic measurement is possible using magnetic fluid.

研究分野：計測制御工学

キーワード：磁性流体 磁気変動 磁気検出 非接触計測 生体情報 植物 生体生理活性 生体電気信号

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

日本の植物工場数は増加トレンドにあり、ここ数年の異常気象や災害による露地作物価格の大幅変動は植物工場への注目をさらに高める要因となった。従来は栽培環境をプログラム制御によって単純管理する植物工場が主体であったが、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指標として栽培環境を能動的に制御するSPA（スピーキングプラントアプローチ：生体との対話）が現場に導入されるケースも見られるようになった。この手法は制御工学におけるフィードバック制御に相当し、外乱、すなわち植物工場内での突発的異常に対して強みを持つことから、植物工場の自動化と相性が良いと考えられた。

植物の生体情報として、光合成量、クロロフィル蛍光、葉面温度、葉面や可食部の色や大きさなどが挙げられるが、これらは総じて生体生理活性に起因する「結果」であり、観測可能となるまでに時間差が生じる二次的指標である。一方で、生体電気信号は、生体生理活性に伴う細胞のイオン濃度変化に起因しており、生体生理活性の一次的指標と言えることから、供試植物の状態変化をいち早く捉えられる。研究代表者らは植物やキノコの生体電位と生長との関係の解明に長年取り組み、生体電気信号を指標としたSPAタイプの新規植物工場を提案してきた。従来の生体電気信号計測では、接触電極によって測定対象の成長や信号そのものに影響を及ぼす懸念があった。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計測は不可欠と考えられ、研究遂行の意義は大きかった。

### 2. 研究の目的

研究の目的は、磁性流体を用いて植物の生体情報（生体生理活性）を非接触計測する新規手法を確立することにある。図1は磁性流体を用いた植物の生体生理活性の非接触計測の概念図を示す。供試植物体内に磁性流体（ナノオダフェライト粒子のコロイド溶液）を吸収させ、外的刺激に対する生体生理活性について、溶液輸送に乗じた磁性流体の移動に伴う極微弱磁気変動を捉えることで、間接的に非接触で生体生理活性をリアルタイム計測する。

また、研究過程で達成する見込みの「磁性流体による供試植物体内への磁性付与」、最終段階で達成する「磁性流体を用いた植物の生体生理活性の非接触計測」は我々の調査の限り世界初の取組例であり、関連分野への技術寄与を目的とした学術的知見の深化も目指す。

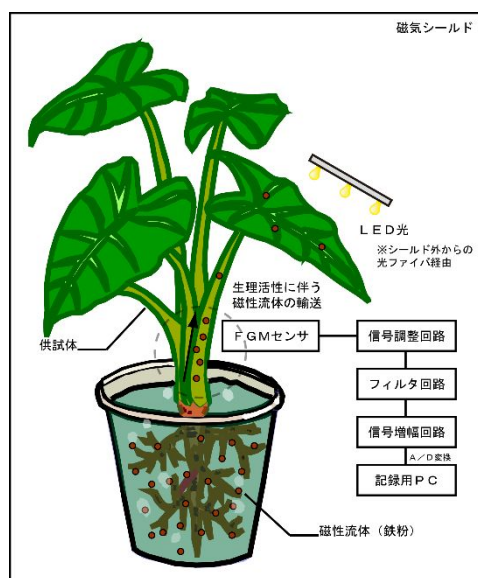


図1 磁性流体を用いた植物の生体生理活性の非接触計測の概念図

### 3. 研究の方法

#### 極微弱磁気計測系の構築

本研究で用いる磁気センサの感度はpTオーダーであり、電気機器の動作や遠方での車の移動に由来する磁気雑音の影響を著しく受ける。磁気雑音の除去のため、磁気計測系は地磁気レベルで磁気遮断可能な磁気シールドルーム(MSR)に配置するが、地磁気を除去すると磁性流体は磁気を帯びないため、MSR内で任意強度の静磁場を印加する必要がある。予備実験では試作のヘルムホルツコイルにより均一静磁場を確保するとともに、コイルに流す電流に比例して磁場強度を強めることで磁性流体の磁気強度が高まり、磁性流体の検出下限量を低めることに成功している。そこで、大型のヘルムホルツコイルを新規に製作してコイル巻数と電流を増すことで検出系の感度を向上させ、これを中心とした極微弱磁気計測系を構築した。

#### 磁性流体を吸収した植物由来の磁気検出

本研究の最終目標達成には、供試植物の茎部から吸収された磁性流体が葉部に到達して磁気を帯びることが前提となる。この現象を確認するため、構築した極微弱磁気計測を用いて、茎部から磁性流体を吸収した供試植物葉面の試料由来の磁気検出を試みた。フェローテック社製の磁性流体 P-0801（粒子径約 10 nm，アニオン系分散剤，水ベース）を蒸留水で濃度 5 % と 10 % に希釈し、この溶液 15 mL を水切りしたクワズイモ (*Alocasia odora*) 茎部から 5 日間吸収させて成り行き栽培した。栽培後の供試植物について、磁性流体付着部位を排除した上で茎部と葉部に分類し、これらを乾燥、粉碎した上で非磁性容器に封入して試料を得た。この試料を、計測系のシールドルームの外からの遠隔操作によって磁気センサ前で前後に揺動させ、磁性植物の茎部と葉部由来の磁気の検出を試みた。

#### 光刺激に対する磁性植物由来の磁気変動の検出

磁性流体吸収により磁性を得た供試植物（以下、磁性供試植物）に外的刺激を与え、生体生理活性を誘発させることで磁性供試植物体内の磁性流体移動を促し、これに伴う磁気変動の検出を試みた。まず、ガラス製メスシリンダに濃度 1 % または 5 % の磁性流体 P-0801 溶液を注いだ上で、水切りしたクワズイモの茎部を挿入して磁性流体を吸収させた。次に、この供試体葉面をヘルムホルツコイル中心部に設置し、光強度  $18 \text{ W m}^{-2}$  の赤色 LED 光（中心発光波長 625 nm）の 30 分間隔の明滅を光ファイバ経由で葉面に提示した。

### 4. 研究成果

#### 構築した磁気計測系

図 2 は構築した極微弱磁気計測系の構成図を、図 3 は製作した大型のヘルムホルツコイルの写真をそれぞれ示す。磁気雑音遮断のため、計測系は金沢工業大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。ヘルムホルツコイルは内径 660 mm，巻数 24 回で、コイル電流 5 A 時に約 225  $\mu\text{T}$  の磁場強度が得られる。コイル電流の変動による磁場変動を極力抑えるため、電源には高性能定電流源（6642A，Hewlett-Packard 社製）を用いた。性能確認試験にて、コイル電流 5 A 設定時にリップル 0.1 % での 72 時間以上の安定した動作を確認し、コイルからの発熱がシールドルーム内の温度にほぼ影響を与えないことも確認した。ヘルムホルツコイル中心部に常温で pT オーダの磁気感度を有する FGM: Flux Gate Magnetometer（520A，APS 社製）センサを配置し、検出信号はデータロガーにて記録できるようにした。

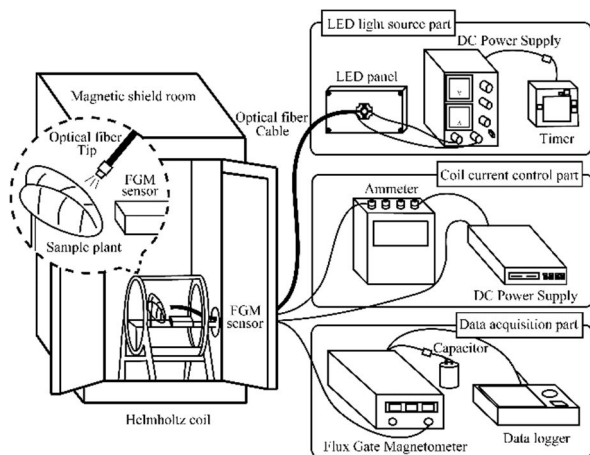


図 2 極微弱磁気計測系の構成図

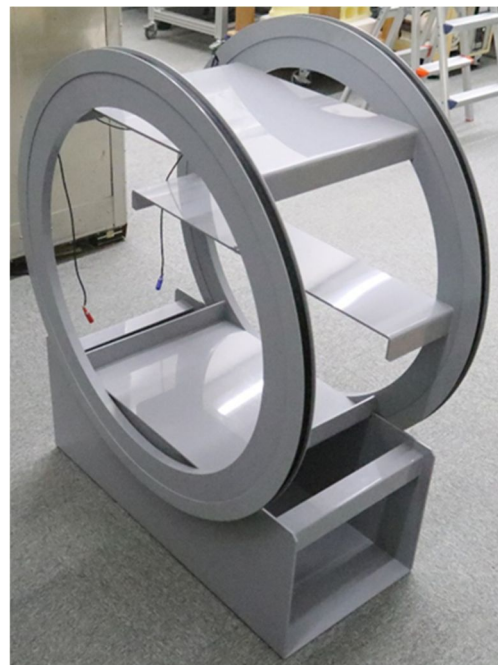
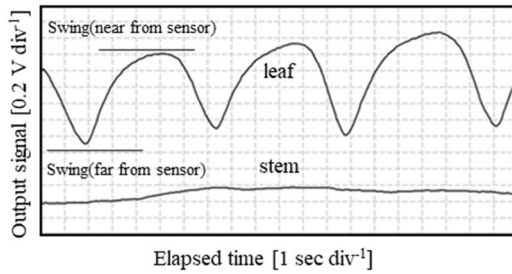


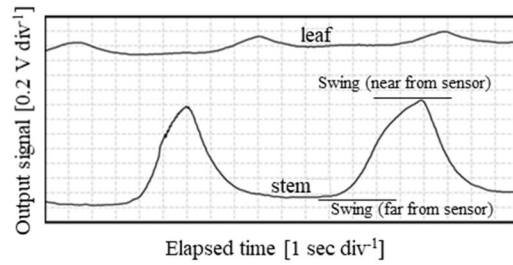
図 3 試作したヘルムホルツコイル

#### 磁性流体を吸収した植物から検出された磁気

磁性流体溶液濃度 5 % と 10 % で得た試料を FGM センサ前で揺動した際に検出した磁気変動を図 4 (a) (b) にそれぞれ示す。図示のように、両濃度において茎部と葉部の試料揺動による磁気変動が認められ、5 % では葉部、10 % では茎部においてその変動は顕著であった。この結果について、デジタル顕微鏡による断面観察では 10 % 溶液を茎部から吸収させた供試植物の茎部において磁性流体と思われる黒ずんだ塊が複数認められる傾向にあり、これが導管を詰まらせたことで葉部への磁性流体移動を阻害したと考えられる。5 % 溶液では葉部の試料から明らかに磁気を検出しており、茎部から吸収された磁性流体が葉部に到達することが裏付けられた。



( a ) 磁性流体溶液濃度 5 %



( b ) 磁性流体溶液濃度 10 %

図 4 各種濃度の磁性流体溶液を吸収させた試料を揺動した際に検出された磁気変動

#### 光刺激に対する磁性植物からの磁気応答

濃度 1 %の磁性流体溶液を吸収させた磁性植物葉面に光源の明滅を提示した際の磁気変動を図 5 に示す。図示のように、人の活動が盛んになる日中は磁気雑音が増加したため磁性植物由来の磁気応答を認めることは困難であったが、図中丸印にて示した早朝の時間帯には光源の明滅に伴う磁気変動が認められた。磁気変動が認められた時間帯 3 時間分の磁気応答を新たに図 6 に示す。図示のように、光源の明滅に伴って磁気は増減した。このような光の明滅に対する磁気の周期的変動は常時確認されず、光の明滅に対する磁気センサの機械的な応答の可能性は排除される。また、磁性流体を吸収させていない供試植物に差し替えて光の明滅を提示した場合には磁気応答が見られないことも事前に確認している。植物はバイオリズムにより光刺激に対して生体電位応答を示す時と示さない時があり、このバイオリズムによって本実験でも光の明滅に対する応答の有無が生じたと考えられる。濃度 5 %の実験でも同様に、わずかながら光の明滅に追従した磁気変動が認められた。上記結果から、植物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。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が可能であると結論した。

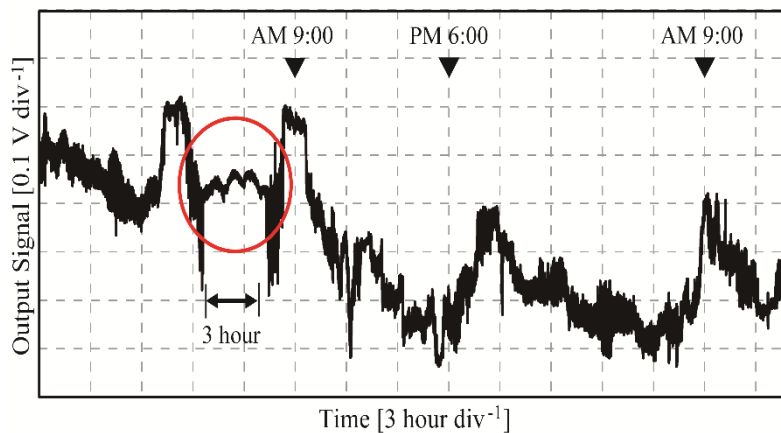


図 5 磁性植物葉面に光源の明滅を提示した際の磁気変動 ( 溶液濃度 1 % )

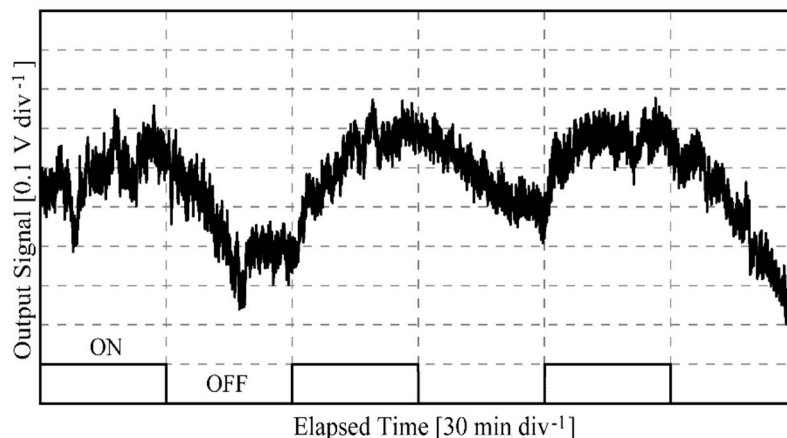


図 6 光源の明滅に対して磁気変動が認められた時間帯の拡大図

以上のように、本研究では磁性流体を用いて植物の生体情報（生体生理活性）を非接触で計測する新規手法の確立を目指して各種の実験に取り組み、磁気計測を介して光刺激に対する植物生体生理活性を非接触で捉えることに成功したと評価できる。我々の調査の範囲においてこれは世界初の事例である。今後は試行回数を増加して、再現性を高める必要がある。

磁性流体を用いて光の明滅に対する植物の生体生理活性を非接触で計測することに成功したことで、計測電極を用いない軽負荷での長時間の生体情報計測の確立に道筋を得た。また、当該手法は複数の磁気センサ併用で、植物やヒト体内での代謝の安価なリアルタイムイメージングに応用可能であり、本研究を通じて極めて重要な知見を得ることができたと評価できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 柳橋秀幸, 松永晃磨, 平間淳司, 松井良雄
2. 発表標題 SPA型植物工場に向けた植物生理活性の非接触計測の試み
3. 学会等名 日本生物環境工学会2019年千葉大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松永晃磨, 小林典正, 高松紘太郎, 柳橋秀幸, 平間淳司
2. 発表標題 磁性流体溶液の吸収が植物に及ぼす影響
3. 学会等名 日本生物環境工学会2019年度中部支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 樋谷友紀, 柳橋秀幸, 平間淳司
2. 発表標題 磁性付与した植物の茎部と葉部由来の磁気計測の試み
3. 学会等名 令和3年度電気関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 植物への磁性付与と磁気計測の試み
2. 発表標題 樋谷友紀, 柳橋秀幸, 平間淳司
3. 学会等名 令和3年度日本生物環境工学会北信越支部大会学生のための研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------