

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K12429

研究課題名（和文）光合成と光形態形成を「太陽光の光質制御」で可能にする植物生育用無機蛍光体の創製

研究課題名（英文）Inorganic Phosphors for Plant Growth Enabling Photosynthesis and Photomorphogenesis by Controlling the Light Quality of Sunlight

研究代表者

石垣 雅（ISHIGAKI, Tadashi）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・技術専門職員

研究者番号：70451995

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は光質変換による農作物栽培の効率化に着目し研究を行った。コロナ禍の影響で計画変更し、代替措置を講じ研究を進めた。主な成果は、1. 植物栽培に適した蛍光特性を持つ無機蛍光体を合成し、この蛍光体が分散したフィルムをインフレーション装置で作製した。2. フィルムに入れる蛍光体や散乱材について、光学シミュレーションを行い、測定にて比較した。3. このフィルムを太陽光下の使用を再現するため、通常の直進光による光学測定ではない、積分球を使った光学系で測定を行った。4. 作製したフィルムを使い、サクラの切り枝への促成処理で光質処理を行い、花弁の色が濃くなることを確認し、アントシアニン抽出によって定量比較した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで耐久性の点で不十分であった光質変換型の農業用フィルムについて、無機蛍光体を初めて用い作製した。無機蛍光体自体は蛍光灯全廃により需要が大きく減るが、新たな用途の可能性も見出された。また、無機蛍光体による光の散乱効果を測定の面でも確認することができ、これを用いた植物体への施用により、効果があることの一端を明らかにすることができた。供試体植物(ケイオウザクラ)の品質向上も期待でき、今後の展開にも期待できる。

研究成果の概要（英文）：This research focused on improving the efficiency of crop cultivation through light quality conversion. The plan was changed due to the corona disaster, and alternative measures were taken to carry out the research. The main results are as follows: 1. Inorganic phosphors with fluorescent properties suitable for plant cultivation were synthesized, and films containing these phosphors were fabricated using an inflation device; 2. Optical simulations were performed for the phosphors and scattering materials in the films, and the results were compared by measurement; 3. The films were used for optical measurements using an integrating sphere, instead of the usual optical measurement using direct light, to reproduce the use under sunlight; 4. Using the prepared film, the light quality treatment was applied in the promotion treatment to cherry cut branches, and the color of petals was confirmed to be darker and quantitatively compared by anthocyanin extraction.

研究分野：無機材料科学

キーワード：無機蛍光体 光質変換

1. 研究開始当初の背景

植物の光合成に関する研究は 18 世紀頃から行われており、多くの研究者の興味の対象となってきた。例えばクロロフィルの研究(1913 年)、カルビン回路の研究(1955 年)、ATP 酵素の研究(1978 年)などはノーベル賞の対象研究になっている。

植物体への光質変換に関する研究は 1920 年にアメリカで植物の光周性の発見(Garner, Allard, 1920)を端緒に行われるようになった。1950 年頃には光形態形成の光受容体であるフィトクロムが発見され(Butler, et al., 1959)、研究が飛躍的に発展した。植物の生長の重要な部分を占める光合成の CO₂、水、光のうち光に着目した、「着色フィルム」や「照明」などを使った研究は日本が盛んであり、古くは 1964-82 年の間、研究法人「農業の光線選択利用技術組合」が産官学で精力的に研究し、栽培にも一部応用された。(稲田勝美ら、1984、後藤英司、2008)。しかしこれらは温室や照明設備などの設備投資が必要である。

加えて、色付きセロファンのような着色フィルムの研究では透過光以外の光をカットし、光量自体が減ってしまうだけでなく、使用している有機顔料が太陽光により数か月で簡単に劣化するという課題が浮き彫りになり、近年でも解決されていない(Hamamoto, et al., 2008)。しかしこの課題さえ解決できれば、従来の栽培方法にできるだけ手を加えずに光合成による同化産物を増やす方法として、植物栽培の実用技術への応用が十分に期待できるとも言える。つまり、研究課題の核心をなす「問い」は、「無機蛍光体は植物栽培のための光質変換資材として使えるのか、否か?」になる。

2. 研究の目的

「無機科学」と「栽培学」による、希薄で莫大な太陽エネルギーを有効利用した農業の創製

蛍光体は励起光を吸収し、蛍光する光変換材料である。無機蛍光体は有機物に比べ一般的に耐候性が高く安定な化合物が多い。これは有機物が太陽光に含まれる紫外線によって空気中の水分や酸素と反応し分解することによる。この無機蛍光体の高耐候性を考慮した農業用被覆資材に用いた例は世界的に見ても例がない。これは農業用の被覆資材が有機物(プラスチック)でできているため、作製全般に対する技術思想が有機合成のみに偏ったと思われる。また、半ば異物のような無機蛍光体を均一に分散させる技術が不十分なことも要因と思われる。よって、本研究ではディスプレイや照明機器などの電子デバイスに使われる無機蛍光体を応用し、植物栽培に用いる、これまでにない組合せで独自性と創造性を発揮したい。これは、今までの無機蛍光体は人間の視感度(およそ 400nm-600nm の範囲)に合わせた研究に対し、植物栽培には 400nm 程度から 650-750nm も有効とされる点に着目しているからである。太陽光スペクトルは可視光では青色光が最も多く、長波長の赤色光になるに従い減少する。そこで、長波長を蛍光として発する無機蛍光体について探索する。また、ナスの色づきなど、場合により紫外光も有効のため、新たな対象波長域の蛍光体が必要であることに他ならない。さらに素材研究だけでなく、実際の栽培に適用し収穫に至る状態を調査して、科学的な原理に裏打ちされたより機能の高い農業用被覆資材及び栽培体系の確立を目指す。具体的には、地上に降り注ぐ太陽光線の近紫外～可視光を吸収し、フィトクロムを刺激する赤(R)・遠赤(FR)色光を蛍光発光するような無機蛍光体を探索・合成し、農 PO フィルムに練り込み被覆資材を作製し栽培に利用する。農学分野で R 光、FR 光と呼ばれる波長域の蛍光体について既往の無機蛍光体の研究ではこれまで必要とされていなかった波長域のため、その蛍光体の作製自体に大きな学術的独自性と創造性がある。これにより太陽光はそのままに、R・FR 光は割増しで植物体に照射が可能となり栽培時に同化産物が増加する。

3. 研究の方法

光合成に有効な波長としてフィトクロムの R 光吸収型(Pr:最大ピーク 660-680nm 程度)と FR 光吸収型(Pfr:最大ピーク 720-750nm 程度)が光可逆的に構造変化すると知られている(Borthwick et al., 1952)。第一に、この波長のうち太陽光に含まれる波長範囲の近紫外光を励起光とし、FR 光を発光する蛍光体を探索し、2 つ以上作製し、栽培を行う。順調に研究が進まなかった場合には、R 光を発光する蛍光体を探索し、無機蛍光体を使った栽培を行うこととする。無機蛍光体利用の適期も調査することとする。

研究方法および主な担当は

- i) 固相法により無機蛍光体を合成(鳥取大/工:石垣)
- ii) X 線結晶構造解析で化合物同定(鳥取大/工:石垣)
- iii) 蛍光分光光度計での励起・発光スペクトル測定(鳥取大/工:大観)

- iv) 蛍光体含有シートの作製、耐久加速試験
- v) 植物体に施与し栽培の経過観察
- v-i) シロイヌナズナの DNA 解析 (かずさ DNA 研究所: 鈴木)
- v-ii) 圃場での花卉類への施用栽培 (鳥取園芸試験場: 岸本)
- v-iii) 圃場での蔬菜類への施用栽培 (鳥取大/農: 西原)

であり、それぞれの専門家と協力体制の下で行う。具体的には以下の通り。

これまでの文献調査で Fe^{3+} または Cr^{3+} または Mn^{2+} 、 Mn^{4+} を発光中心とするアルミン酸塩系無機化合物が当該の蛍光を発する化合物群として候補に挙げられる。これらの化合物を i) により合成し、合成された蛍光体は粉末 X 線回折法により ii) で同定する。また、iii) にてスペクトルを測定し、目的に資する物性を有するか調査する。iv) 蛍光体含有シートの作製は公設試 (広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター) の機器を用いる。既に予備実験は済んでおり、この機器でのシートの作製には問題ない。併せて耐久加速試験を公設試 (鳥取県産業技術センター機械素材研究所) の設備を利用して行う。その後、v) 植物体に施与し栽培の経過観察を行う。

Hamamoto, et al., 2008 の報告によれば、「冬期は秋期よりもさらに日射の弱まる可能性が高く、変換資材の作物育成促進効果に多大な期待はできないであろう」とされている。しかし、本当に無機蛍光体を使った光質変換の効果を確認するならば、天候不順な季節、すなわち冬期を含む栽培を実際に行い、データを収集し、無機蛍光体を有効に使う作型を体系化することが不可欠である。最終的には「無機材料科学」と「栽培学」の融合を図り、将来的には日照不良や低日照期の際にも農産物の栽培に活かせる農工融合の知見を獲得したい。

当初の計画は上述の通りではあるが、研究代表者の異動とコロナ禍により計画変更を余儀なくされ、いくつかの変更を行った。

iii)、iv) についてはコンピュータシミュレーションによる光線解析を行うことで、フィルムの特性についての知見を深めた。

また、v) については、主としてケイオウザクラの促成処理への適用及び花卉のアントシアニン抽出定量調査を行った。

研究代表者の職場の移動と職種変更に伴い研究上の制限があり、また、コロナ禍の影響により当初の研究計画からは多くの変更を余儀なくされたが、その中でも査研究を行い、成果を得ることができた。

4. 研究成果

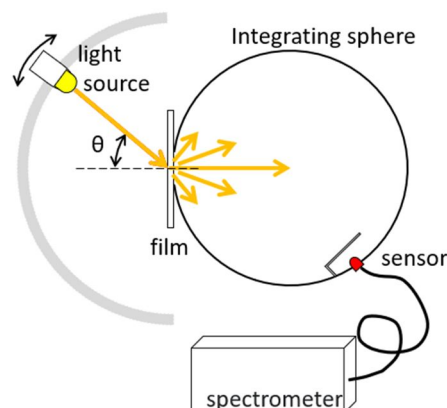
無機蛍光体の合成と分散フィルムの作製

無機蛍光体については、励起光が太陽光に十分含まれ、当該 R 光、FR 光を発光するような蛍光体を文献調査した。いくつかの候補の中から原料に含まれる元素が元素戦略上手に入れやすい組成でできている蛍光体 ($\text{Mg}_2\text{TiO}_4:\text{Mn}$, $\text{Ca}_{14}\text{Al}_{10}\text{Zn}_6\text{O}_{35}:\text{Mn}$) を候補とした。候補とした蛍光体は固相法にて合成し、適切な処理を行いポリエチレンフィルムに混練しやすくなるよう工夫を施した。蛍光体は粉末 X 線回折法により目的の無機蛍光体であると同定した。蛍光分光光度計によっても蛍光特性は確認され、事前の文献調査と一致した。

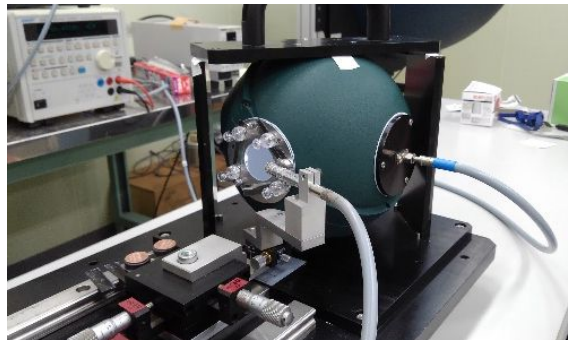
この無機蛍光体が分散されたフィルムは、インフレーション装置によってフィルム化し、供試体を得た。得られたフィルムの見た目は、若干の白濁はあるものの市販のいわゆる「散乱フィルム」に比べれば十分透明度の高いものであった。このフィルムにブラックライトを当てたところ、均一に発光していることが視認された。

フィルムの蛍光特性の調査

圃場では太陽光の降り注ぐ下でフィルムを施用するが、天空の元での太陽光は大まかに「直達光」と「散乱光」に分けられる 2 つの成分の光が地上に降り注いでいる。フィルムに対して圃場での実際の光の状態を想定して特性を評価するためにはこの 2 つの成分を足し合わせた光質を計測する必要がある。しかし、通常市販されているシングルビームないしはダブルビーム型の分光器では、角柱セルなどの試料に対して直線に入ってきた光が、直線的に透過した成分に対しての特性しか評価できない光学系となっている。本研究で作製したフィルムは、無機蛍光体が分散された状態でフィルム中に存在するため、太陽光下での蛍光特性を十分に再現した測定

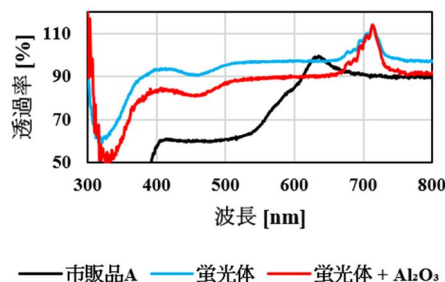


ができていたとは言えない。そのため、フィルムに対して一定の大きさの光を照射し、フィルムを通過した光を積分球で集光して計測する手法を見出した。この時、太陽光の日周運動を再現できるように、光源を一定角度範囲まで可動できるように光学系を作製して測定した。これにより、通常の直達光だけでなく散乱光成分を含むフィルムの分光データを取得することができた。



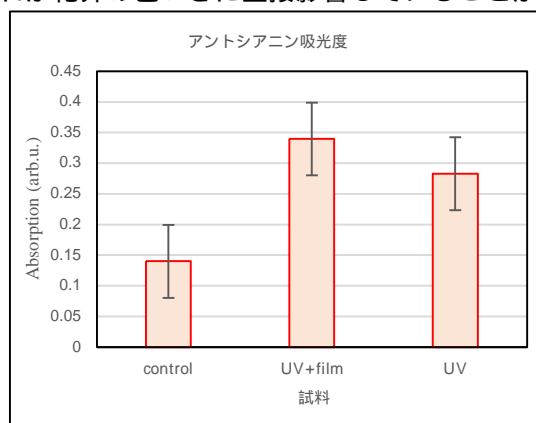
コンピュータシミュレーションによる光線解析

無機蛍光体はフィルム中に分散しているものの、染料というよりは顔料としての性質に近い。蛍光体の濃度をどれくらいまで入れると発光が飽和するのかを光学シミュレーションソフトで計算した。また、蛍光体をナノ粒子の大きさまで小さくするとどのような光学特性が見られるかも併せて計算した。蛍光体の量がおよそ 2wt% で飽和し、蛍光体粒子に加え、150-500nm サイズ程度の散乱材を加えると、全体の強度が増強されることが明らかとなった。



蛍光体フィルムを使った花木の促成時の品質向上

正月の生け花などに使われるケイオウザクラ(啓翁桜)は、初冬のうちに樹木から切り枝として収穫し、寒冷に曝したのち、開花時期を極端に早くするために切り枝に対して促成開花処理を行う。しかし極端に開花を早めるために花弁の色が薄く、品質が低いことが課題となっている。通常光合成など光(太陽光)と植物の相互作用は葉で起こるため、葉のない切り枝に対しての光の反応の研究例は元々少ないが、サクラの切り枝の花弁の色を濃くする方法は既にいくつか提案されている。しかし品種間による差も想定され、ケイオウザクラに適用した報告例はない。そこで、既往の研究を参考に、この作製したフィルムと紫外線(UV-A)を使って促成処理時に光を照射した。照射した供試体は、既往の研究同様に花弁をメタノールに浸漬させ、アントシアニン抽出して定量比較した。枝の様相には照射による変化はないが、花弁については目視段階でかなりの色づきが視認できた。開花後、花弁からアントシアニン抽出して定量比較した。未処理も供試体に比べてアントシアニンの量は多く、これが花弁の色づきに直接影響していることが示唆された。既報の文献にもあるようにアントシアニンの生成は糖と UV 光が主要な要因であると推測されるが、そこに赤色光を付加することによってアントシアニンの生成を強化する要因を付加できる。この方式を用いると、光源は紫外線だけで済み、通常別途赤色光の光源を用意し、かかる電力を削減できる。また、フィルムによる光の散乱効果もあるため、直進性の高い LED 光の利用時には光の均一化も資する方法である。このケイオウザクラの主産地は山形県であるが、この方法は冬場の日射が少ない地域で効率的に光を与えることができる手段であり、薬剤に頼らず品質を向上させることができるため非常に有意義であると考えられる。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山口 直樹 , 熊倉 颯晟 , 大観 光徳
2. 発表標題 AI203ナノ粒子によるレイリー散乱効果を付与した農業用散乱フィルム
3. 学会等名 2022年度 応用物理・物理系学会 中国四国支部 合同学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 熊倉颯晟, 山口直樹 , 祝原颯翔 , 阿部友紀, 大観光徳 , 石垣雅
2. 発表標題 農業用ハウス内の光環境設計に関する研究 – 蛍光体とレイリー散乱を用いたフィルム設計 –
3. 学会等名 2023年農業施設学会学生・若手研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口直樹、熊倉颯晟、祝原颯翔、阿部友紀、大観光徳、石垣雅
2. 発表標題 農業用ハウス内の光環境設計に関する研究–レイリー散乱効果を付与した波長変換フィルムの作製–
3. 学会等名 2023年農業施設学会学生・若手研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takumi Kondo; Tadao Matsunaga; Ei Endo; Kotoku Ohmi; Sang-Seok Lee
2. 発表標題 "Optical Fiber Multipoint Light Measurement System for the Investigation of Plant Cultivation Light Environment"
3. 学会等名 2021 IEEE Sensors (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上野雄祐, 洲濱基志, 石垣雅, 大観光徳
2. 発表標題 炭酸カルシウム添加フィルムにおける光散乱特性の入射角依存性
3. 学会等名 2020年農業施設学会 学生・若手研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 熊倉颯晟, 上野雄祐, 石垣雅, 大観光徳
2. 発表標題 農業用散乱フィルムにおける全光透過スペクトルの精密計測と光学シミュレーション
3. 学会等名 2021年農業施設学会 学生・若手研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松永 忠雄・近藤 拓実・岸本真幸・西原英治・李相錫・大観光徳
2. 発表標題 植物栽培に適した光環境再現を目指した局所、多点光環境計測システムの開発
3. 学会等名 日本農業気象学会2021年全国大会発表
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大観光徳・上野雄祐・熊倉颯晟・石垣雅・阿部友紀・西原英治・坪 充・岸本真幸
2. 発表標題 グリーンハウス内の光環境設計・制御に関する基礎研究 - 農業用散乱フィルムにおける全光線透過率の入射角依存性 -
3. 学会等名 日本農業気象学会2021年全国大会発表
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近藤拓実, 岸本真幸, 西原英治, 大観光徳, 李相錫, 松永 忠雄
2. 発表標題 植物栽培における光環境計測のための光ファイバを用いた多点箇所分光計測システムの開発
3. 学会等名 2021 年農業施設学会 学生・若手研究発表会
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
研究分担者	西原 英治 (Nishihara Eiji) (40452544)	鳥取大学・農学部・教授 (15101)	
研究分担者	久郷 和人 (Kugou Kazuto) (60554425)	公益財団法人かずさDNA研究所・先端研究開発部・研究員 (82508)	
研究分担者	大観 光徳 (Ohmi Koutoku) (90243378)	鳥取大学・工学研究科・教授 (15101)	

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