

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04289

研究課題名(和文) 超高感度光干渉法による多元的植物の環境汚染ストレス・活性の無侵襲極短時間モニタ法

研究課題名(英文) Multidimensional Instantaneous and noninvasive monitoring of environmental stress and activities of plant using highly sensitive interferometric techniques

研究代表者

門野 博史 (Kadono, Hirofumi)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：70204518

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では無侵襲・超高感度な光干渉法である統計干渉法(SIT)を用いて、植物の葉などの表面の2次元の形態応答に見られる新規な現象である植物成長の「自発的ナノメータゆらぎ」の特性を利用する。加えて、バイオスペckル光断層画像法(bOCT)を用いた植物内部の3次元の生理応答情報を統合することにより植物の内部活性および成長として現れる形態的挙動を総合的に捉えるシステムを開発した。有効性を検証するため、マイクロプラスチックによる種子の発芽過程への影響および酸性鉱山廃水(AMD)による植物への影響評価をおこない、いずれも従来法に比べて迅速かつ高感度に影響をモニタできることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土壌のマイクロプラスチックは現状としては大きな問題として認識されていないが、これは実環境での軽微な影響を評価する手法が開発・適用されてこなかったと捉えるべきであり高感度な評価法の開発が緊急の課題である。本研究はこの要求に応えるものである。開発したシステムを用いて、ポリスチレンマイクロプラスチックを植物の種子に暴露する実験をおこなったところ短時間で活性が抑制されることが示された。生分解性プラスチックは分解の過程で、従来のプラスチックよりも植物に対する毒性が大きいとする研究も始めている。環境に優しいと導入が進む生分解性プラスチックであるが毒性が強くなると影響は甚大である。

研究成果の概要(英文)：In this study, Statistical Interferometry Technique(SIT), a non-invasive and ultra-sensitive optical interferometry was used to utilize the characteristics of "Nanometric Intrinsic fluctuation" of plant growth that is a novel phenomenon observed in the two-dimensional morphological response of plant surfaces such as leaves. In addition, we have developed a system that comprehensively captures morphological behaviors that appear as internal plant activity and growth by integrating information on three-dimensional physiological responses inside plants using biospeckle optical tomography (bOCT). To verify the validity of the system, the influence of microplastics on seed germination and acid mine drainage (AMD) on plants were evaluated, and it was confirmed that the system can monitor the environmental influences more quickly and more sensitively than the conventional methods.

研究分野：環境光計測

キーワード：レーザースペckル 光散乱 バイオスペckル 光断層画像法 バイオスペckルOCT マイクロプラスチック 酸性鉱山廃水 土壌汚染

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

大気や土壤汚染に関して、特に経済発展の著しい中国などでは工場や鉱山からの重金属を含む汚水の垂れ流しによって農地の汚染による収量の低下や健康被害が日増しに深刻さを増している。石炭火力発電所や車の排気ガスによる大気汚染も深刻化している。また、バングラデシュなどアジア諸国では高濃度のヒ素を含む地下水による農地の汚染が深刻化している。

加えて、環境汚染物質として近年マイクロプラスチック(MPs)による海洋汚染が注目を集めている。環境中に流出したMPsは輸送過程で、外的要因すなわち紫外線や熱、風波などの物理的な力により破碎、細片化しマイクロプラスチック(MPs)となる。これらは海洋生物に摂食され生態系へ大きな影響を与えることが指摘されている。しかし、MPsの問題は海洋だけではない。農業ではマルチングやビニールハウスに大量のプラスチックが使用されてきた。近年では、環境に配慮し生分解性プラスチックが用いられるようになった。生分解性プラスチックは微生物の作用により時間を経て細片化・分解されるがその過程では海洋のMPs同様の問題を呈することは想像に難くない。

したがって、作物植物を主対象として環境ストレス評価法の開発は重要である。また、植物を用いた土壤浄化のための植物や作物植物の収量を確保するためには、環境汚染に対して耐性がある植物種を選択・育種する必要がある。しかしながら、耐性の評価には、乾燥重量や成長長さ測定などの従来法では長期間を必要とする。

我々はこれまでに、光干渉法である2つの基礎技術の開発をおこなってきた。第1は、統計干渉法(SIT)と名付けた極めて超高感度光干渉計測法である。1波長の千分の一、すなわち、サブナノメータの計測精度で植物の生長挙動を秒スケールでモニタすることを可能とした。第2はバイオスペckル光断層画像(bOCT)法である。bOCT法によれば生体内部の活性状態を無侵襲かつ実時間で可視化することができる。基礎実験の結果、本技術は従来の解剖学的な断層画像のみならず細胞組織の生物学的な活性状態を反映した断層画像が得られることが示された。

2. 研究の目的

本研究の目的は、我々が提案してきたSITおよびbOCT法により得られた情報を統合することにより、植物の環境に対する極短時間成長動態を精密に知ることで、新しい実時間かつ高感度な植物の環境ストレスモニタリング技術を確立することである。具体的な環境ストレスとして特に、重金属影響に焦点を絞り、植物の重金属ストレス影響の高感度評価法を確立する。近年問題となっている、その他の環境汚染要因としてマイクロプラスチックの影響を考慮する。このような技術は、将来的にファイトレメディエーションへの応用を視野に入れ、特定の目的に適した耐性を持つ植物種の効率的な選択評価法としての有効性が期待される。

本研究のサブテーマを以下に列挙する。

- ① バイオスペckル光断層画像法および統計干渉計測統合システムの設計・構築
- ② 重金属ストレスに対する植物成長のナノメータゆらぎ(NIF)およびバイオスペckルOCT信号の相関解析に基づく高感度ストレスモニタ法の開発
- ③ マイクロプラスチックの植物影響評価に対する有効性の検証

3. 研究の方法

研究計画の初期段階では、統計干渉計測システム(SIT)とバイオスペckル光断層画像法(bOCT)での植物サンプルを同時観測可能なシステムを設計・構築した。次に、この装置を用いた植物の表面および内部の環境ストレス応答の多元的解析手法の開発をおこない、実験によりその有効性を検証した。

(1)計測システム

Fig.1に装置の構成図を示す。統計干渉法(SIT)装置に関しては既に、企業と共同して開発した小型軽量化が図られた装置が利用可能であるのでこれを改良して用いた。試料下部に示すOCTシステムは生体試料に対して2つの波長、840nmおよび1.3μmの波長を用いて光ファイバを用いて新たな設計をおこなった。システム全体はLabviewを用いて扱いやすいユーザーインターフェースを持つ計測ソフトウェアを構築した。

SITシステムにおいてはbOCTシステムのプローブ光と干渉しないよう波長630nmの赤

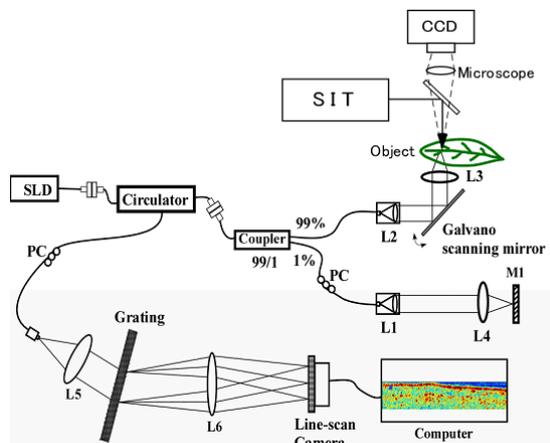
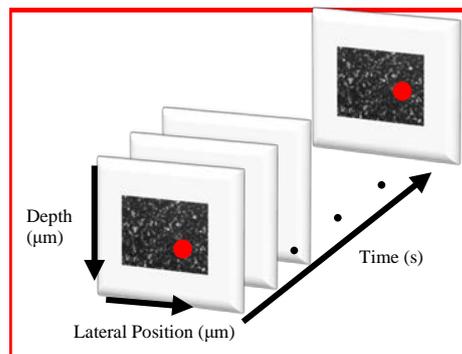


Fig.1 システム構成図

色光を用いている。SITシステムでは2つの平行ビームを試料に対して垂直に照射し、2点からの照射光により発生した独立なスペックルパターンの干渉の結果として生じるスペックル干渉画像を取り込むことにより、照射2点間の伸縮をサブナノメートルの精度で計測することができる。これにより植物の成長挙動すなわち形態的環境応答を秒スケールで計測可能とした。

bOCTシステムにおいては深さ分解能約 $6\mu\text{m}$ を達成している。また、ガルバノミラーによるスキャンによりx-y方向に数mmのスキャンを可能とした。断層画像の取得速度は10fpsである。



(2) バイオスペックル信号

OCT法は既に眼科などで実用化されている技術であるが、従来のOCT法は対象物体の解剖学的な構造を可視化することしかできない。すなわち生理学的な機能情報を得ることはできない。一方、生体をレーザー光で照射すると、ランダムな散乱光の干渉によりスペックルパターンと呼ばれるランダムなパターンが生成される。このとき、生体内部の物質の輸送、細胞器官の運動、原形質流動や微細構造の変化を反映してスペックルパターンもランダムに変動する。これをバイオスペックルと呼び、変動の早さから生体の活性状態を計測することができる。このバイオスペックル信号に基づいて生体内部の活性状態を3次的に可視化する手法がバイオスペックルOCT(bOCT)法である。Fig.2に示すように断層画像の1点におけるOCT信号を時間軸に沿ってプロットするとランダムに変動している。この信号に対して、信号変動の標準偏差 σ_I と平均強度 $\langle I \rangle$ の比からスペックルコントラスト $\gamma = \sigma_I / \langle I \rangle$ を定義する。組織の活動が活発になるほどこの値は大きくなると考えられるので我々はこれを組織活性の指標として用いることとした。

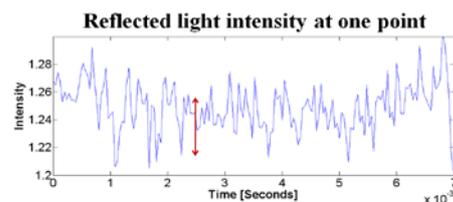


Fig. 2 断層画像の1点における信号の時間変化

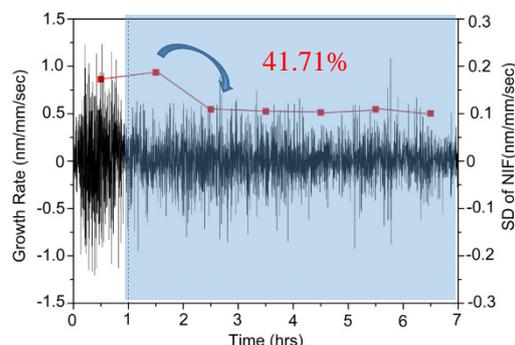


Fig.3 Cd(0.1mM)のナノメータ成長ゆらぎへの影響

(3) 統計干渉法による植物成長の自発的ナノメータゆらぎ(NIF)

SITは感度が非常に高いため、植物の極短時間の成長挙動を秒スケールでモニタできる。これを用いてこれまでに植物は単調に成長するのではなく、短時間に激しく揺らいでいることを明らかにした。我々はこれを植物成長の自発的ナノメータゆらぎ(NIF)と名付けた。Fig.3にカドミウム(Cd)(濃度0.1mM)を植物(ニラ)の根に暴露した実験結果の一例を示す。これは、ニラの葉の5秒間の伸縮から成長速度を算出し7時間にわたってプロットした結果である。1hrの時点から根にCdを暴露した。Cd暴露によりNIFが劇的に変化していることは明らかであるが、注目すべき発見が2つある。第一は、暴露以前は成長速度が $\pm 0.2\text{nm/mm}$ 秒で激しく変動していることである。我々はこの現象が多くの実験により他の植物でも広く観察される普遍的な現象であることを確認した。すなわち、マクロには一様に成長しているかに見える植物は、秒スケールの極短時間で成長を観察するとナノメータスケールのゆらぎを伴いながら成長している。これは従来の植物学では誰も考え付いていないことである。第二の発見は、暴露後は非常に短時間(数時間)で揺らぎが減衰していることである。我々はこの他にも種々の異なる環境下で実験を繰り返し、NIFが、環境変化に敏感に、しかも短時間に応答することを明らかにした。植物の成長をナノメータレベルで計測した例はこれまでに無い。同時にこの現象が環境ストレスを非常に敏感に反映することから、環境汚染物質の毒性評価をリアルタイムで行うための有力な手段を提供するものである。

4. 研究成果

(1) マイクロプラスチックの植物影響評価

近年、環境問題として注目されているマイクロプラスチック(MPs)の植物影響のモニタを試みた。MPとして粒径分布 $0.74\text{-}5\mu\text{m}$ のポリエチレンマイクロプラスチック(PEMP)を用いた。植物サンプルはレンズ豆の種子である。Fig.4にPEMP(濃度10, 50, 100mg/L)をレンズ豆に6, 12, 24時間暴露した際のスペックルコントラスト断層画像を示す。図は赤色ほどスペックルコントラストが高く、活性が高いことを示している。Controlでは浸水直後から徐々に活性度が上昇していることがわかる。一方、PEMPを暴露した種子では、濃度が高いほど青色の領域が多くControlに比べ

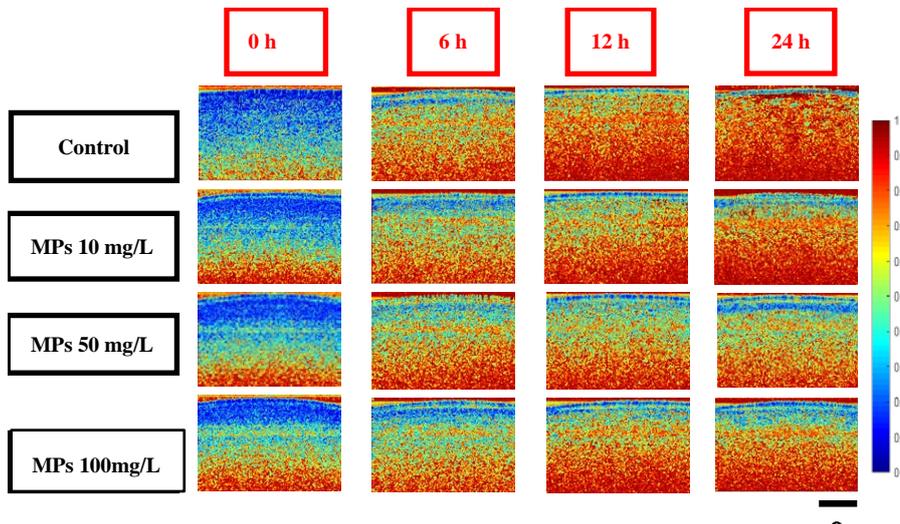


Fig. 4 ポリエチレンマイクロプラスチック(濃度 10, 50, 100mg/L)をレンズ豆に 6, 12, 24 時間暴露した際のスペックルコントラスト断層画像

て活性度低くなっていることがわかる。Fig.5は浸水6時間後の比較的表層付近の平均バイオスペックルコントラストの変化を示している。平均発芽時間は24時間であるので、発芽以前の非常に早い僅か6時間で有意な影響がモニタできたことを示している。

一方、発芽前の種子の段階では茎や葉の伸張を伴う通常の生育段階前であるためにNIFによる観測では有意な変化を観測できなかった。

本実験ではMPsにより実際に種子にストレスが与えられていることを確認するため、従来の手法である抗酸化酵素活性およびTTCテストによる生化学的評価、長さや乾燥重量による収量評価をおこない本手法と比較した結果、実際にストレスが付加されており本手法と一致することを確認した。ただし、生化学的手法により有意な結果を得るには48時間を要し、また破壊検査であるので本手法の優位性は明らかである。

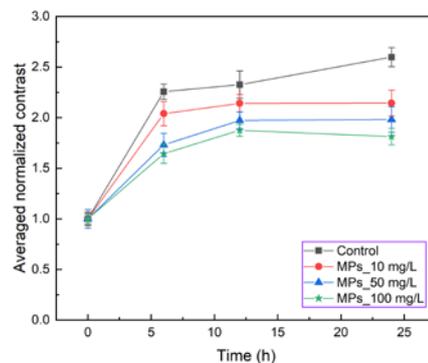


Fig. 5 ポリエチレンマイクロプラスチック暴露に対する平均バイオスペックルコントラストの変化

- 1) De Silva, Y.S.K., Rajagopalan, U.M., Kadono, H., Li, D., 2021. Positive and negative phenotyping of increasing Zn concentrations by Biospeckle Optical Coherence Tomography in speedy monitoring on lentil (*Lens culinaris*) seed germination and seedling growth. *Plant Stress*, 2, 100041. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100041>
- 2) De Silva, Y.S.K., Rajagopalan, U.M., Kadono, H., Li, D., 2022. Effects of microplastics on lentil (*Lens culinaris*) seed germination and seedling growth. *Chemosphere*, 303, 135162. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135162>
- 3) De Silva, Y.S.K., Rajagopalan, U.M., Kadono, H., Li, D., 2023. Biospeckle optical coherence tomography in monitoring the synergic effect of polyethylene microplastic with zinc on lentil (*Lens culinaris*) seed germination and seedling growth. *Heliyon* (Submitted / with editor)

(2) 酸性鉱山廃水(AMD)による植物影響の評価

酸性鉱山廃水は鉱山からの廃水であり重金属を多量に含む酸性の汚染水である。AMDによる土壌汚染はアジア、アメリカ、アフリカなど世界各地で発生している。本実験ではAMDの模擬水として実際のAMDに最も多く含まれる鉄に対してFeSO₄を用いてカイワレダイコン、ダイズ、イネに対して暴露実験をおこなった。カイワレダイコンでは最も影響が大きく僅か1時間後の早期に有意な差がbOCT法により検出可能であった。続いてダイズでは6時間で濃度(Fe48mg/L)で有意な差を観測した。Fig.6に示すようにイネは比較的Feに対する耐性が強く、興味深い現象として、逆にFe24mg/Lの濃度では促進作用が観測された(72時間後)。これは、Fe微量元素

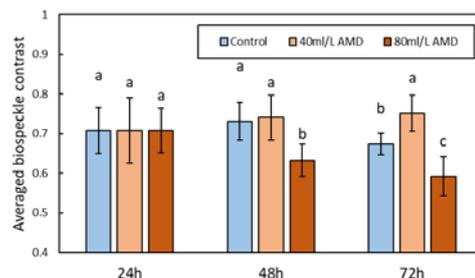


Fig. 6 イネの種子に AMD (Fe24, 48mg/L) 暴露した際のバイオスペックルコントラストの変化 (24, 48, 72 時間後)

として作用しているものと思われる。

続いて、SITによる観測結果をFig. 7に示す。濃度Fe24mg/LのAMDを純水からスタートした後1.5時間から暴露を開始した。図からわかるように暴露直後からNIFが増加していることがわかる。このとき揺らぎの標準偏差は20.1から40.5nm/mm secへと2倍に増加しており、bOCTにより観測された活性化の傾向と一致している。

- 1) D. Li, Rajagopalan U. M., De Silva Y.S.K., Kadono H.*, F. Liu., 2021. Biospeckle optical coherence tomography (bOCT) in the speedy assessment of the responses of the seeds of *Raphanus sativus* L. (Kaiware Daikon) to acid mine drainage (AMD)[J]. *Applied Sciences*, 12(1): 355. <https://doi.org/10.3390/app12010355>
- 2) D. Li, Rajagopalan, U. M., Kadono, H., De Silva, Y.S.K., 2022. Speedy evaluation of simulated Acid Mine Drainage (AMD) on Rice by a non-invasive technique. *Plant Stress* (6), 100113. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100113>
- 3) D. Li, Rajagopalan, U. M., Kadono, H., De Silva, Y.S.K., 2022. A Real-Time, Non-Invasive Technique for Visualizing the Effects of Acid Mine Drainage (AMD) on Soybean. *Minerals* 2022, 12(10). <https://doi.org/10.3390/min12101194>

(3) 総括

統計干渉法(SIT)とバイオスペックル断層画像法(bOCT)を統合することにより植物の種子から発芽成長段階の活性・ストレス状態を非破壊、高感度かつリアルタイムで多角的にモニタすることができた。実験により、2つの異なるモニタ手法がより有効な植物の成長段階が存在することも明らかになった。提案手法による結果は従来法によるストレス評価結果とも一致しており、本手法による評価法の有効性が確認された。しかし、従来法に比べて極めて早期に評価可能であることが大きな利点である。本研究は環境科学のみならず農業分野、植物科学の分野においても大いに貢献可能である。

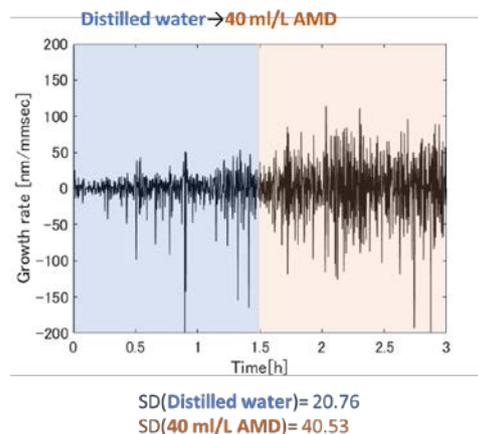


Fig. 7 イネに AMD(Fe24mg/L)暴露した際の NIF の変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Li Danyang, Uma-Maheswari R., Kadono H., De Silva Y. Sanath-K.	4. 巻 6
2. 論文標題 Speedy evaluation of simulated Acid Mine Drainage (AMD) on Rice by a non-invasive technique	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plant Stress	6. 最初と最後の頁 100113 ~ 100113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.stress.2022.100113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Li Danyang, Rajagopalan Uma Maheswari, Kadono Hirofumi, De Silva Y. Sanath K.	4. 巻 12
2. 論文標題 A Real-Time, Non-Invasive Technique for Visualizing the Effects of Acid Mine Drainage (AMD) on Soybean	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Minerals	6. 最初と最後の頁 1194 ~ 1194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/min12101194	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 De Silva Y. Sanath K., Rajagopalan Uma Maheswari, Kadono Hirofumi, Li Danyang	4. 巻 303
2. 論文標題 Effects of microplastics on lentil (<i>Lens culinaris</i>) seed germination and seedling growth	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemosphere	6. 最初と最後の頁 135162 ~ 135162
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemosphere.2022.135162	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Li Danyang, Rajagopalan Uma Maheswari, De Silva Y. Sanath K., Liu Fenwu, Kadono Hirofumi	4. 巻 12
2. 論文標題 Biospeckle Optical Coherence Tomography (bOCT) in the Speedy Assessment of the Responses of the Seeds of <i>Raphanus sativus</i> L. (Kaiware Daikon) to Acid Mine Drainage (AMD)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 355 ~ 355
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app12010355	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 De Silva Y. Sanath K., Rajagopalan Uma Maheswari, Kadono Hirofumi, Li Danyang	4. 巻 2
2. 論文標題 Positive and negative phenotyping of increasing Zn concentrations by Biospeckle Optical Coherence Tomography in speedy monitoring on lentil (<i>Lens culinaris</i>) seed germination and seedling growth	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plant Stress	6. 最初と最後の頁 100041 ~ 100041
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.stress.2021.100041	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 De Silva, Y.S.K., Rajagopalan, U. M., Kadono, H.	4. 巻 7
2. 論文標題 Microplastics on the growth of plants and seed germination in aquatic and terrestrial ecosystems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Glob. J. Environ. Sci. Manag	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kumara De Silva Yakdehige Sanath, Rajagopalan Uma Maheswari, Li Danyang, Kadono Hirofumi	4. 巻 121470C
2. 論文標題 Optical screening method to observe the biological activities of lentil (<i>Lens culinaris</i>) seeds quantitatively under the exposure of polyethylene microplastics (PEMPs) using ultrahigh accurate biospeckle optical coherence tomography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 12147, Tissue Optics and Photonics II	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2620176	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Y. S. K. De Silva, U. M. Rajagopalan, L. Danyang, H. Kadono
2. 発表標題 Optical inspection of the combined effect of polyethylene microplastic with Zn on lentil seed germination using Biospeckle Optical Coherence Tomography
3. 学会等名 70th JSAP Spring Meeting
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 De Silva, Y.S.K., Rajagopalan, U. M., Kadono, H.
2 . 発表標題 Biospeckle Optical Coherence Tomography reveals the mitigation of the harmful effects of heavy metal zinc in combination with polyethylene microplastics in Lentil seeds
3 . 学会等名 SPIE Future Sensing Technology (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Y. Sanath. K. De Silva, D. Li, R. Uma Maheswari, Fenwu. Liu, H. Kadono
2 . 発表標題 Biospeckle Optical Coherence Tomography in high-speed monitoring of environmental effects on seeds germination
3 . 学会等名 25th ICO and 16th OWLS conference, (Dresden, Germany) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 D. Li, R. Uma Maheswari*, H. Kadono*, Y. Sanath. K. De Silva, Fenwu. Liu
2 . 発表標題 Rapid Assessment of the Effect of Acid Mine Drainage (AMD) on seeds by Biospeckle Optical Coherence Tomography (bOCT)
3 . 学会等名 25th ICO and 16th OWLS conference, (Dresden, Germany) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 D. Li, R. Uma Maheswari, H. Kadono*, Y. Sanath. K. De Silva
2 . 発表標題 Biospeckle Optical Coherence Tomography (bOCT) reveals variable effects of acid mine drainage (AMD) on monocot and dicot seed germination
3 . 学会等名 Europe 2022 SPIE Photonics Europe (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 D. Li, R. Uma Maheswari, Y. Sanath. K. De Silva, H. Kadono
2 . 発表標題 valuation of soybean seed vigor under exposure of Acid mine drainage (AMD) by biospeckle optical coherence tomography (bOCT)
3 . 学会等名 69th Japanese Society of Applied Physics(JSAP) Spring Meeting
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Y. S. K. De Silva, U. M. Rajagopalan, L. Danyang, H. Kadono
2 . 発表標題 Optical coherence tomography detection and quantitative evaluation method to examine the effect of polyethylene microplastics (PEMPs) on lentil seed germination
3 . 学会等名 69th JSAP Spring Meeting
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 D. Li, R. Uma Maheswari, Y. Sanath. K. De Silva, H. Kadono
2 . 発表標題 Biospeckle optical coherence tomography in monitoring the effect of Acid mine drainage (AMD) on rice germination
3 . 学会等名 82nd Japanese Society of Applied Physics(JSAP) Autumn Meeting
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Y. S. K. De Silva, U. M. Rajagopalan, L. Danyang, H. Kadono
2 . 発表標題 In vivo monitoring of polystyrene microplastics effect on lentil seed germination and seedling growth using Biospeckle Optical Coherence Tomography
3 . 学会等名 82nd JSAP Autumn Meeting
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. S. K. De Silva , U. M. Rajagopalan, L. Danyang, H. Kadono
2. 発表標題 Effect of Zn toxicity on lentil seed germination through high speed monitoring of Biospeckle Optical Coherence Tomography
3. 学会等名 68th JSAP Spring Meeting
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Danyang Li
2. 発表標題 High speed assessment of AMD on germination radish seeds using biospeckle optical coherence tomography
3. 学会等名 第 6 7 回応用物理学会春期学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sanath De Silva
2. 発表標題 Biospeckle Optical Coherence Tomography in monitoring the effect of micronutrient Zinc on lentil seed germination
3. 学会等名 第 6 7 回応用物理学会春期学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sanath De Silva
2. 発表標題 High speed assessment of the effect of micronutrient Zinc and Alumina on lentil seed germination using Biospeckle Optical Coherence Tomography
3. 学会等名 第 8 1 回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Danyang Li
2. 発表標題 Biospeckle optical coherence tomography in monitoring the effect of Acid mine drainage (AMD) on plant germination
3. 学会等名 第 8 1 回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sanath De Silva
2. 発表標題 Monitoring the effect of Alumina nanoparticles on lentil seed germination using Biospeckle Optical Coherence Tomography
3. 学会等名 Joint Symposia on Optics, Optics & Photonics Japan 2020
4. 発表年 2020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	山口 雅利 (Yamaguchi Masatosi) (20373376)	埼玉大学・理工学研究科・准教授 (12401)	
研究分担者	ラジャゴパラン ウママヘスワリ (Rajagopalan Umamaheswari) (40270706)	芝浦工業大学・工学部・教授 (32619)	
研究分担者	L I M Y I H E N G (Lim Yiheng) (10789457)	埼玉大学・理工学研究科・助教 (12401)	

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