

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05188

研究課題名（和文）植物生産の高度化に向けた選択的沈着による無機化合物散布システムの開発

研究課題名（英文）Development of a Spraying System by Selective Deposition toward Advanced Plant Production

研究代表者

レンゴロ ウレット（LENGGORO, WULED）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：10304403

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）：本プロジェクトでは、肥料の微粒子を液滴にキャリアとして使用する選択的沈着による無機化合物散布システムを開発した。この手法により、微粒子が植物に効率的に沈着でき、過剰な肥料の環境負荷を低減できる。微粒子の調製、沈着・剥離技術の検討、可視化手法の開発などを行い、植物成長チャンバーでの実証実験に成功した。副次的成果として、光熱変換膜と生体内水分観察システムの開発にも貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発された選択的沈着による化合物散布システムは、植物生産における肥料利用の最適化に大きく貢献する。従来の一様散布に比べ、必要な部位にのみ肥料を届けることで、過剰投入による環境負荷を抑制できる。作物生産性の向上と環境保全の両立に貢献できる学術的に重要な成果である。

また、副次的な成果である光熱材料や分析手法の開発も、広く科学技術に波及効果をもたらす。膜状の光熱材料は熱の局在化に優れ、海水淡水化など様々な用途が期待される。バイマス中水動態の可視化の手法は、他分野の研究にも活用できる。本研究は、植物生産のみならず関連する幅広い分野の発展に寄与する社会的意義の高い研究であった。

研究成果の概要（英文）：This project developed a selective deposition system for inorganic compounds using droplets as carriers for "fertilizer" fine particles. This method enables efficient deposition of microparticles onto plants while reducing environmental impacts of excess fertilizers. We synthesized fine particles, investigated deposition/removal techniques, developed visualization methods, and successfully demonstrated the system in a plant growth chamber. Subsidiary achievements include developing a photothermal conversion membrane and a system for observing water dynamics in biomass.

研究分野：プロセス工学

キーワード：沈着 散布 微粒子 液滴 帯電 植物 物質移動 分光

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

植物が育つためには栄養素が必要であり、肥料はその栄養素を人工的に与えるものである。現在の主な肥料の一つである窒素肥料の大量生産が実現したのは、ハーバー・ボッシュ法(1913年)によって鉄系触媒と水素・窒素を出発原料としたアンモニア製造技術が確立されたことによる。育成された植物のためには、特に必要な(肥料として)栄養素が窒素とリン酸とされている。実際、農家は農作物栽培の収穫量を高くしようとして、肥料が過剰に使われる傾向がある。この過剰施肥は、数十年間欧米を中心に抑制されてきたものの、多くの国々では依然として、コスト・大気や水汚染・植物の病気の問題となっている。

リン酸を例にする。リンは土壌からの供給量だけでは足りない栄養素である。リン酸の資源国が限られ、中国や米国等では、毎年数百万トンもの燐灰石が採掘されており、これに硫酸を作用させて農業用肥料である過リン酸石灰などを生産する。将来の世界の食糧供給が不安定になるという報告が多い。

農作物等の植物に吸収されていない肥料のほとんどは土壌の反応性・汚染物質となり、下流の水汚染の問題とつながる場合が多く、大気中にも拡散する。窒素肥料の場合、30%しか植物に吸収されず、残りの70%が環境中に反応性窒素(活性窒素種)として残る。実際に、地球温暖化を促進する高い能力を有する大気中の窒素の発生源は、自動車や工場で化石燃料を燃やすことで生じる反応性窒素は年間2500万トンに対して、肥料を製造する工程からだけでも年間1億6千万トンであり、オゾン汚染の原因として報告されている。

2. 研究の目的

環境と食料生産とを両立させるには、肥料の供給を抑制することが求められている。しかし、投入量の最適化ならびにその散布効率向上に関する研究は遅れている。本応募研究では、肥料の微粒化(ナノ粒子化)を行い、その微粒子のキャリアとしてナノメーターとマイクロメーター・スケールの帯電液滴群を用いることで、肥料が植物に選択的に沈着される散布システムの開発を行う。高い選択性と沈着力を持つ散布システムの開発と育成実験に基づく評価により、植物の成長を促進しつつ、吸収されない肥料成分を最小化する食料生産体系の構築を目指している。

3. 研究の方法

【2020年度】多成分系無機化合物であるカルシウム・リン(Ca-P)系の肥料を対象材料とした。まず、肥料を微粒化(ナノ粒子化)し、ナノ粒子懸濁液を作成しようとして試みた。しかし、生成した粒子の溶解挙動(各イオンが水にどの程度溶解するか)を先に解明する必要があることが判明した。そこで、異なるpHを持つサンプル水中での粒子の溶解挙動を評価するため、電子顕微鏡による形態変化と懸濁液中の粒子径分布を用いた。真空条件下での電子顕微鏡観察では、サンプル水への浸水前後で同じ粒子を観察することが困難であったが、この問題を解決した。

【2021年度】【研究1】植物表面をモデル化した基板に沈着した微粒子を脱離(剥離)させるための技術を開発した。【研究2】気中における液滴および微粒子の挙動およびその沈着率に影響が大きいと考えられる、地面(土壌)からの水蒸発の制御に関する検討を行った。

【2022年度】微粒化された肥料のエアロゾル(液滴群)を植物葉に高い効率で沈着させることが大きな課題の一つである。植物葉の表面および内部における微粒子と液滴(またはバルク液体)の輸送について検討を行った。同大学の電気電子工学(光学系)の岩井研究室と連携しながら、

【研究1】蛍光微粒子を用いた液体を含む物質の輸送を「可視化」する解析、【研究2】2つの近赤外波長を用いたスペクトル領域光干渉断層計システムを用いて、室温での蒸発過程を断面画像化と定量分析が可能な手法の開発を行った。

【2023年度】植物生産の高度化に向けた選択的沈着による化合物散布システムの開発を目的とした本研究では、微粒子を帯電液滴にキャリアとして使用することで、微粒子が植物に選択的に沈着される散布システムの開発を行った。副次的な成果として、帯電液滴を用いた新しい光熱材料の提案や、近赤外線2波長を使用したバイオマス中液体移動観察システムの開発につながった。

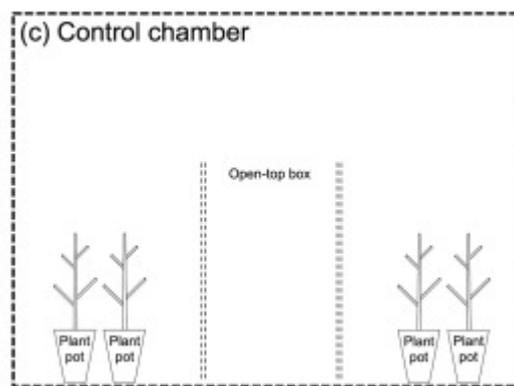
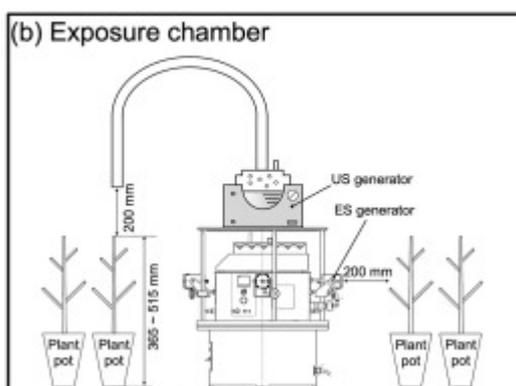
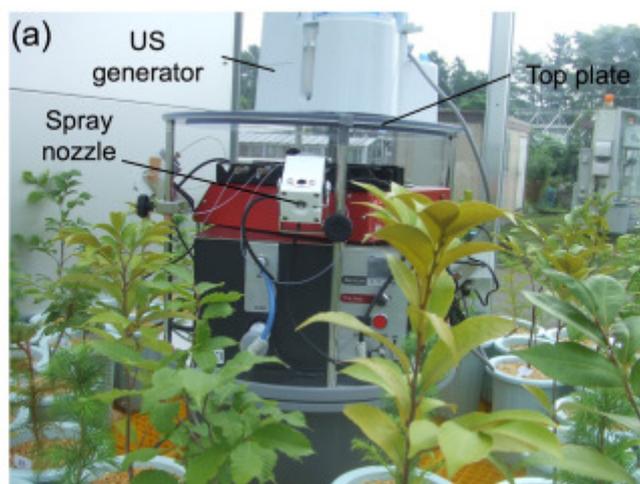
4. 研究成果

【2020年度】Ca-P系の粒子を合成する際の加熱時の操作温度が生成粒子の結晶構造に及ぼす影響が確認できていたが、本研究においても結晶性が優れているCa-P系の粒子が溶解しにくいことが確認された。一方、Ca-P系の結晶として不完全な粒子の方が溶解しやすいことも確認された。続いて、肥料を含んだ懸濁液を気中に分散して、目的の表面(植物の葉など)に散布できるような装置を新たに試作した。静電噴霧が基本となるが、電界と熱流体シミュレーションを行った結果、噴霧ノズルと目標との距離が重要であり、目的の(3次元的な)表面の位置付けが重要な役割を持つことが確認された。

【2021年度】【研究1】高精度な化学分析は液相を用いる手法が多く、微粒子が沈着した固体表面を液体へ導入させて、微粒子の脱離を行うことが一般的であるが、固体表面上に沈着したサブミクロン(数百ナノメーター)粒子を高い効率で剥離させることが難しい課題とされてきた。本

研究では低出力の超音波洗浄機の水系サンプルに「不活性」物質である数百ナノメートル煤粒子を混入させることで、沈着された目的のサブミクロン粒子の脱離が容易になった。使用した煤粒子はロウソクの燃焼で得られたもので、数週間や数か月において水中に安定した分散性を示しており、研究室で偶然に発見した珍しい現象と物質であった。【研究2】水の蒸発を抑制するために一般的にプラスチックシートが使われているが、本研究では、天然の粘土質土壌試料にシランカップリング剤系コーティングを適用し、土壌の疎水性を高めることができた。蒸発フラックスの大きさは、土壌層内に疎水性処理土層を置くことにより調整できた。

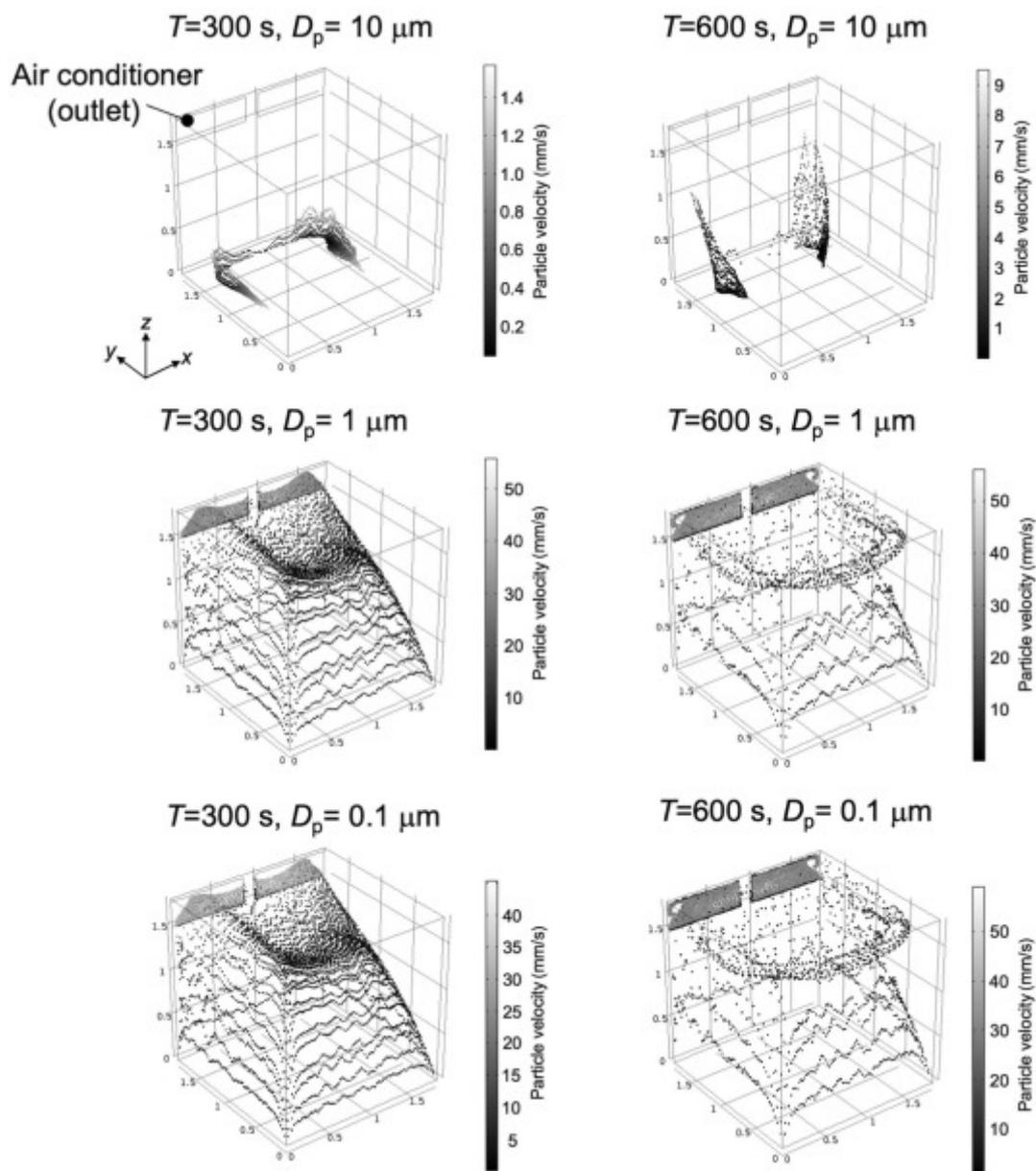
【2022年度】【研究1】では、モデルとしてタバコの葉およびセルロース繊維のような多孔質媒体中に流れる液体に蛍光微粒子を混入させておいて、その液体の輸送を「可視化」した。葉のような媒体中においてマイクロリットル液体輸送のためのトレーサとして蛍光微粒子の使用を試みた。画像解析を用いて葉の各部位に存在する蛍光粒子分布をマッピングすることにより、液体の広がりや浸透を可視化できることを示した。また、本可視化法によりある部位に意図的に挿入させた数十から数百ナノメートルの微量不純物（煤粒子）も検出することができることも確認した。【研究2】では、植物（生体組織）に局在する水分量を定量的に測定する方法は確立されていないことから、同大学・岩井研究室では2つの近赤外波長を用いたスペクトル領域干渉断層計システム（SD-OCT）を開発した。光源の波長は水にほとんど吸収されない1060 nmと1470 nmを用いた。この2波長OCTを用いて光散乱による蒸発過程も伴う水の輸送を測定する可能性を示した。SD-OCTは、これまで観測されなかったことのない現象を可視化し、定量的に分析するための非常に実用的なツールであることがわかった。



【2023年度】主な成果として、植物成長チャンバー（上図）を設計・作成し、超音波（上図：US generator）や静電気力（上図：ES generator）による散布方法でサブミクロン粒子の浮遊と植物への沈着を実現した。チャンバー内の流れを3次元の数値計算で予測し、効率的な運転条件を見出した。植物成長チャンバーを設計・作成して、それを使ってサブミクロン粒子の植物への沈着について詳細に調査した。具体的には、以下のポイントに焦点を当てた。この時に、炭素系（すす）粒子と一緒に水溶性多成分（他元素）粒子も使用した。散布方法としては、超音波と静電気力を利用した2つの散布方法を実験的に評価し、サブミクロン粒子の浮遊と植物への沈着を実現した。特に、葉面へのサブミクロン粒子の沈着速度を詳細に調査した。チャンバー内流れの状態を数値計算によって予測し、最適な運転条件を示した（下図、T:時間、Dp=発生粒子サイズ）。これにより、散布システムの効率向上に寄与できる。

一方、副次的な成果としては、帯電液滴を利用した新しい光熱材料の提案と、近赤外線2波長を使用したバイオマス中の液体移動観察システムの開発があった。帯電液滴に煤粒子を混ぜたポリマー繊維膜を開発し、煤粒子を光熱変換材料として活用することで、膜内部での熱の局在化が向上した。この膜を太陽蒸留に用いると、水の蒸留と淡水化の効率が高まることがわかった。

また、連携先の岩井研究室が開発した近赤外線 2 波長スペクトルドメイン光コヒーレンストモグラフィ (SD-OCT) システムを用いて、生物組織内部の水のダイナミクスを定量的に可視化・解析することに成功した。SD-OCT は、これまで観測が困難だった自然現象の解明に有用なツールとなり得ることが示された。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Asanuma Yosuke, Pratiwi Tiara N., Wada Mitsuki, Iwai Toshiaki, Wuled Lenggoro I.	4. 巻 20
2. 論文標題 Liquid Transport of Heated Glycerol-Water Mixtures with Colloidal Fluorescent Particles through Multiple Biomass Layers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 13 ~ 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/ejssnt.2022-008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Asanuma Yosuke, Faizal Ferry, Khairunnisa M.P., Lenggoro I. Wuled	4. 巻 33
2. 論文標題 Deagglomeration of spray-dried submicron particles by low-power aqueous sonication	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 103543 ~ 103543
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.appt.2022.103543	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 Faizal Ferry, Maulana Mochamad Irfan, Wuled Lenggoro I., Panatarani Camellia, Made Joni I	4. 巻 2376
2. 論文標題 The development of simple microcontroller-based QCM with some treatment on the crystal oscillator surface	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012013 ~ 012013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2376/1/012013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 M. P. Khairunnisa, Faizal Ferry, Miyazawa Eiji, Masuda Kohji, Tsukada Mayumi, I. Wuled Lenggoro	4. 巻 54
2. 論文標題 Detachment of Submicron Particles from Substrates Using the Suspension-Assisted Ultrasonic Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Chemical Engineering of Japan	6. 最初と最後の頁 135 ~ 143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1252/jcej.16we319	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Zaini Nurul Solehah Mohd, Lenggoro I. Wuled, Naim Mohd Nazli, Yoshida Norihiro, Man Hasfalina Che, Bakar Noor Fitrah Abu, Puasa Siti Wahidah	4. 巻 32
2. 論文標題 Adsorptive capacity of spray-dried pH-treated bentonite and kaolin powders for ammonium removal	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 1833 ~ 1843
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.appt.2021.02.036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Abu Bakar N.F., Abd Rahman N., Mahadi M.B., Mohd Zuki S.A., Mohd Amin K.N., Wahab M.Z., Wuled Lenggoro I.	4. 巻 48
2. 論文標題 Nanocellulose from oil palm mesocarp fiber using hydrothermal treatment with low concentration of oxalic acid	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials Today: Proceedings	6. 最初と最後の頁 1899 ~ 1904
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matpr.2021.09.357	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Asanuma Yosuke, Toyota Koki, Nishimura Taku, Lenggoro I. Wuled	4. 巻 33
2. 論文標題 Surface treatment of clayey soil particles for reducing water loss through evaporation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 103465 ~ 103465
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.appt.2022.103465	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mohamed Hasaan Hussain, Noor Fitrah Abu Bakar, Kim-Fatt Low, Ana Najwa Mustapa, Fatmawati Adam, Mohd Nazli Naim, I Wuled Lenggoro	4. 巻 57
2. 論文標題 Growth-controlled synthesis of polymer-coated colloidal-gold nanoparticles using electrospray-based chemical reduction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Particuology	6. 最初と最後の頁 72-81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.partic.2020.12.004	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 Pratiwi Tiara N., Gen Masao, Lenggoro I. Wuled	4. 巻 34
2. 論文標題 One-step fabrication of soot particle-embedded fibrous membranes for solar distillation using candle burning-assisted electrospinning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 104190 ~ 104190
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.appt.2023.104190	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 Makino T., Ujino H., Lenggoro I. W., Iwai T.	4. 巻 30
2. 論文標題 Imaging and quantitative analysis of water evaporation process using spectral-domain optical coherence tomography under illumination with two near-infrared wavelengths	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 158 ~ 165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10043-023-00792-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Gen Masao, Ikawa Seiji, Yamaguchi Masahiro, Lim Fong Zyin, Izuta Takeshi, Lenggoro I. Wuled	4. 巻 85
2. 論文標題 A plant growth chamber system equipped with aerosol generators for studying aerosol-vegetation interactions	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Particuology	6. 最初と最後の頁 122 ~ 132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.partic.2023.03.018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Tiara N. Pratiwi, Yosuke Asanuma, Toshiaki Iwai, I. Wuled Lenggoro
2. 発表標題 Observation of Glycerol-Water Mixtures Transport Through Heated Biomass Layers Using Colloidal Fluorescent Particles
3. 学会等名 9th World Congress on Particle Technology (Madrid) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Asanuma, W. Lenggoro
2. 発表標題 De-agglomeration of spray-dried particles by ultrasonification
3. 学会等名 8th Asian Particle Technology Symposium (APT 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. N. Pratiwi, W. Lenggoro
2. 発表標題 Heating and cooling of surfaces by randomly deposited sub-micrometer particles
3. 学会等名 8th Asian Particle Technology Symposium (APT 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Takahashi, N. Yoshida, T. Tsuchiya, W. Lenggoro
2. 発表標題 Preparation and dissolution behavior of multicomponent metal oxide particles
3. 学会等名 8th Asian Particle Technology Symposium (APT 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 W. Lenggoro
2. 発表標題 植物における物質輸送に関する微粒子工学研究と人材育成 (依頼講演)
3. 学会等名 化学工学会第87年会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wuled Lenggoro
2. 発表標題 Aerosolized nano-scale particles as tools for analysis and functionalization
3. 学会等名 Functional Nano Powder International Conference 2020 (Indonesia) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wuled Lenggoro
2. 発表標題 ろうそく燃焼から得られる機能性材料としてのすす微粒子の可能性を探る
3. 学会等名 2023年度第1回粉体グリーンプロセス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Wuled Lenggoro
2. 発表標題 Particle Technology for Agricultural Studies: Designing “Tools” for Solving Technical Issues and Gaining New Insights.
3. 学会等名 2023 INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGY FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (Agrotechnology and Environment Symposium) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Wuled Lenggoro
2. 発表標題 静電噴霧法によるコロイダル粒子の構造化と形態的特性の調整: シリカとススの事例研究
3. 学会等名 第3回静電気学会・エアロゾル学会合同シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Lenggoro Lab: Journal Paper Introduction
<https://empatlab.wordpress.com/tag/paper/>
Lenggoro at ORCID
<https://orcid.org/0000-0002-0048-8486>
Lenggoro at Crossref.org
https://search.crossref.org/?q=lenggoro&sort=year&from_ui=yes
Researchmap
<https://researchmap.jp/wlenggoro>
Lenggoro at Google Scholar
https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=en&hl=en&user=7JWJ1XQAAAAJ&sortby=pubdate
Lenggoro Lab website
<https://empatlab.wordpress.com>
Lenggoro Lab Research Site
<https://empatlab.net/research/>
Lenggoro Research Map
<https://researchmap.jp/wlenggoro>
レンゴロ・研究サイト
<https://researchmap.jp/wlenggoro>

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