

PRESS RELEASE

2026 年 8 月 6 日

理化学研究所

京都大学

科学技術振興機構（JST）

環境フレンドリーな微生物由来窒素肥料を開発

ー海洋性紅色光合成細菌の窒素肥料効果と環境負荷の解明ー

概要

理化学研究所（理研）環境資源科学研究センターバイオ高分子研究チームの沼田圭司チームディレクター（京都大学大学院工学研究科／地球環境学堂教授）、京都大学成長戦略本部の中崎鉄也特任教授、京都大学大学院農学研究科附属農場の中野龍平教授らの共同研究グループは、海洋性の紅色光合成細菌由来の微生物バイオマスが、既存の農業生産システムの中で環境フレンドリーな有機質窒素肥料として有効に機能することを実証しました。

本研究成果は、農業生産現場で生じる温室効果ガスの削減や窒素肥料の国産化に貢献すると期待されます。

世界の農業は、ますます増大する食料需要を満たすという大きな圧力に直面しています。食料供給は窒素肥料に依存していますが、従来の無機肥料は自然環境への流出、温室効果ガスの排出、土壌劣化などを大きく引き起こしています。有機肥料は環境面での利点があり、ゆっくりと安定的に窒素を放出しますが、従来の動物性および植物性肥料は窒素含有量が低い（C/N 比^[1]が高い）ため無機化が遅く、特定の条件下では温室効果ガス（二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素）を多量に生成します。このため十分な施肥効果を有し、環境負荷の小さな代替肥料が早急に必要とされています。

本研究では、海洋性紅色光合成細菌の一つ、*Rhodovulum sulfidophilum*（*R. sulfidophilum*）に由来する微生物バイオマスに酵素反応速度論的解析^[2]を行い、ゆっくりと安定的に窒素を放出することを実証しました。この緩やかな無機化により、無機肥料と比較して亜酸化窒素の排出量が大幅に削減されます。ブロッコリーほ場での利用実験では、共同研究グループが作製した微生物バイオマス肥料が、作物の収量を維持または向上させることが示され、これを窒素肥料として施用することが温室効果ガス低排出型の野菜生産のための有望な戦略であると示しました。これは土壌に利用された海洋性紅色光合成細菌バイオマスが無機化される過程、亜酸化窒素の発生に与える複合的な影響を解明した最初の研究です。

本研究は、科学雑誌『*npj Sustainable Agriculture*』オンライン版（8 月 6 日付：日本時間 8 月 6 日）に掲載されました。



栽培試験によって示しましたが^{注2)}、実際に農作物を育てる土壤に適用した窒素の無機化、およびほ場栽培システムに組み込んだ場合の影響は未解明のままでした。本研究では、この知見のギャップを埋めるため、ほ場栽培における利用可能性を評価するとともに窒素放出パターンと亜酸化窒素排出量を分析し、その実用性の実証を試みました。

注 1) 国連食糧農業機関 (FAO) 「World Agriculture: Towards 2010」

<https://www.fao.org/4/v4200e/V4200E00.htm>

注 2) 2024 年 6 月 11 日プレスリリース「光合成細菌を窒素肥料に」

https://www.riken.jp/press/2024/20240611_1/

研究手法と成果

R. sulfidophilum の培養細胞を溶解・乾燥して調整した微生物粉末サンプル(以下、PB (processed biomass: 加工バイオマス) と記述) の窒素含有量は $11.0 \pm 0.27\%$ (C/N 比: 4.50 ± 0.22) であるのに対して、鶏ふんや牛ふんは 1~4% (C/N 比: 10~14 程度)、稲わらやおがくずなどの植物残さは 1%未満 (C/N 比: 30~100) です。このことから、有機肥料として一般的に使用される分解の遅い炭素に富む残さとは異なり、PB が容易に無機化可能な基質であり、利用可能な窒素を迅速に放出できると推察できます。

共同研究グループは、以前にコマツナで実施した PB 利用のポット試験研究において、低温条件と高温条件では PB の無機化速度が異なることが示唆されたことから、本研究では、まず土壤培養実験^[6]によって、異なる温度条件下での土壤無機窒素(アンモニア態窒素; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ と硝酸態窒素; $\text{NO}_3\text{-N}$) の経時的变化を解析しました。土壤培養実験を実施するに当たり、ほ場を条件の異なる区画(以下、〇〇区と条件ごとに記載)に分けて実験しました。アンモニア態窒素に関しては、10℃条件下ではゆっくりと蓄積し、7 日目に増加した後、21 日目と 28 日目に減少しました。20℃では急速に出現しましたが、3 日目と 7 日目には急速に減少しました。30℃では、わずかな増加しか見られず、1 日目以降に急激に減少しました。硝酸態窒素の蓄積も温度依存性がある傾向を示し、10℃では 28 日間かけて徐々に増加が見られましたが、高温(20℃と 30℃)では、特に標準窒素利用量の 2 倍の窒素量を利用した PB2 区において蓄積が速くなりました。土壤中の有機態窒素は、一般に微生物の活動によりアンモニア化と硝化のプロセスを経て植物に利用されることから、PB が有機質窒素肥料として機能することが実証されました。

さらに、今回のデータを用いて酵素反応速度論的解析を行った結果、活性化エネルギー (E_a)^[7] は、1 モル当たり 30 キロジュールと推定され、低 C/N 比から想定される通り、他の有機質肥料の窒素に比べて無機化されやすいことが確認され、土壤温度から無機化量の推定が可能であることが示されました。

一方、ほ場栽培条件下での PB の窒素肥料としての有効性を評価するために、まず化学肥料(IF)と同じ窒素利用量で PB を利用し、その効果を比較しました。その結果、PB の利用によって、SPAD 値^[8]、葉の長さ、花蕾(からい: ブロッコリーの食用部)の直径(図 1a)は、無施肥区(NG)より有意に高い値を示し、IF と同程度であり、PB はブロッコリーの露地栽培における基肥として効果的に

機能していることが確認されました。これらの知見に基づいて、ブロッコリーとスイートコーンの連続栽培試験を実施しました。施肥区として、無肥料（NG）、市販の有機肥料（OF）、PB（PB1、PB2）、化学肥料（IF）の五つの異なる区を設定して栽培しました。PB2 以外の区は当該作物が必要とする標準的な窒素量を利用する区としました。2 作期（2023 年と 2024 年播種（はしゅ））のブロッコリーの生育調査において、2024 年の葉の乾物重（葉を乾燥させた重量）は、肥料処理間で有意な差を示し、IF 区が最も大きな値となりましたが、OF、PB1、PB2 の各区とは統計的に同程度でした（図 1b）。PB2 区の乾物重が IF 区と同程度に高い値を示したことから、施肥を繰り返すことによる蓄積効果の可能性が確認されました。花蕾当たりの窒素吸収については、PB1、PB2、OF、および IF の区で、NG 区と比較して有意に高い窒素吸収を示しました。露地ほ場におけるブロッコリーの生育調査から、PB 利用によって IF や OF と同様に植物利用可能な窒素を効果的に供給できることが実証されるとともに、持続可能で環境フレンドリーな代替手段となり得ることが示されました。

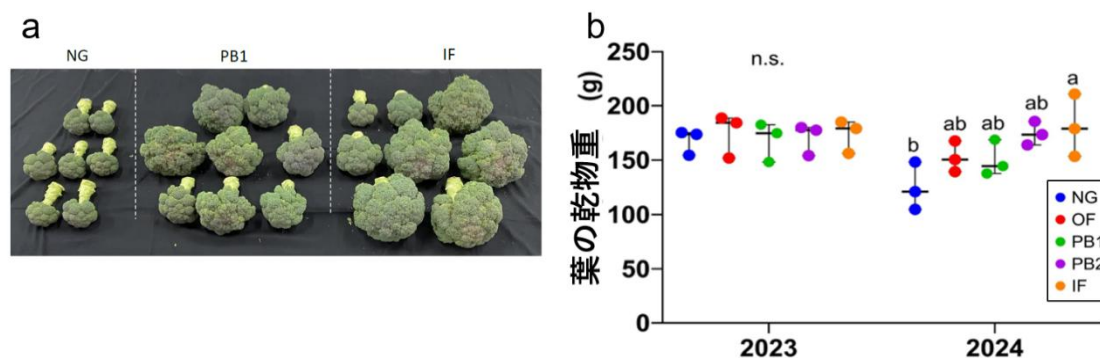


図 1 PB 継続利用ほ場栽培におけるブロッコリーの生育状況

(a) PB を元肥利用したほ場実験における各施用区の花蕾の収穫時の様子。(b) PB の継続利用ほ場実験(2023 年および 2024 年)におけるブロッコリーの葉の乾物重に及ぼす施肥処理の効果の比較。異なるアルファベットは、Tukey 検定で有意差 ($p < 0.05$) があることを示す。「n.s.」は、処理間に有意差が認められなかったことを示す。各データ点は 3 反復 ($n=3$) の平均値であり、各反復は 4 個体の平均値である。エラーバーは平均標準誤差を示す。

以前のコマツナのポット試験や本研究のほ場試験において、PB2 区では IF 区の 2 倍の窒素利用量であるにもかかわらず IF 区と同様の生育を示しました。この観察結果は、作物の生育は供給する窒素量だけでなく、窒素放出パターンにも依存している可能性が高いことを示しています。また、土壌からの亜酸化窒素の生成は土壌中の窒素動態と密接に関連しているため、PB と IF 間の窒素無機化および亜酸化窒素排出量を比較するために、試験区として‘PB1.5’、‘PB2.25’IF1’および‘IF1.5’を設けて、土壌培養実験を実施しました。

‘PB1.5’、‘PB2.25’はそれぞれ化学肥料（IF）の試験区‘IF1’の窒素量の 1.5 倍および 2.25 倍を PB で利用する区とし、‘IF1.5’は IF1 区の 1.5 倍の窒素量の処理区です。これは、PB が IF よりも窒素の無機化が遅いため、PB1.5 区と IF1 区および PB2.25 区と IF1.5 区がそれぞれ同程度の無機態窒素（アンモニア態窒素＋

硝酸態窒素)の蓄積を示すことを期待する処理区設計としたものです。その結果、PB 利用量を増やすと無機態窒素放出が促進されることが統計的に確認され、PB2.25 区と IF1.5 区、PB1.5 区と IF1 区それぞれで同程度の無機態窒素蓄積が確認されました(図 2a)。これらの結果は、IF からの窒素放出が速く短期間であるのとは対照的に PB の無機化は遅いが安定しており、植物が利用できる窒素を長期間供給できることを示しています。従って、PB 利用量を調整することで、栄養素の利用可能性を作物の要求量に合わせ、肥料利用効率を向上させられることが示されました。

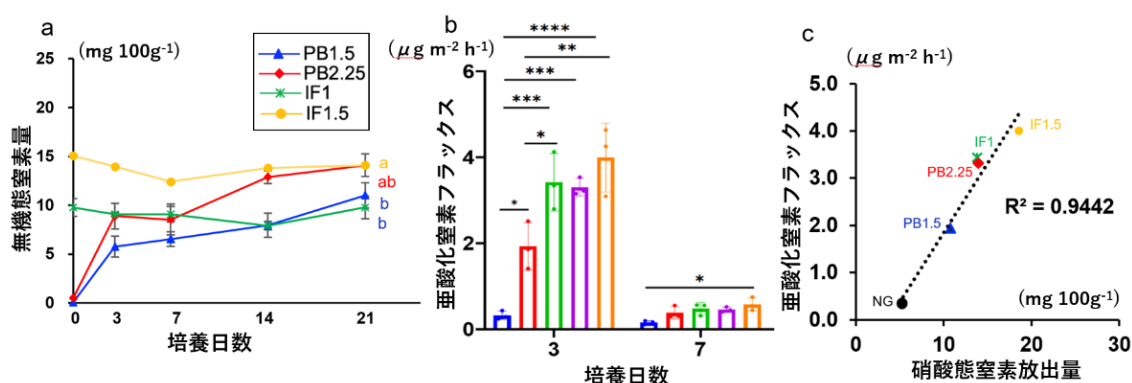


図 2 PB 利用土壌中の窒素動態および亜酸化窒素フラックスの変化

(a) 無機態窒素量(アンモニア態窒素+硝酸態窒素)の推移。(b) 土壌培養 3 日目および 7 日目における亜酸化窒素フラックス。左から、NG 青、PB1.5 赤、PB2.25 緑、IF1 紫、IF1.5 黄。(c) 硝酸態窒素放出量と亜酸化窒素フラックスとの相関。異なるアルファベットおよびアスタリスクは、Tukey 検定で、各測定日における肥料処理区間で有意差($p < 0.05$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, **** $p < 0.0001$)があることを示す。各データポイントは 3 反復($n=3$)の平均値であり、エラーバーは平均標準誤差を示す。 $\text{mg } 100\text{g}^{-1}$: 100g 当たりのミリグラム。 $\mu\text{g m}^{-2}\text{h}^{-1}$: 1 平方メートルにおける 1 時間当たりのマイクログラム(100 万分の 1 グラム)。

一方、亜酸化窒素フラックス⁹⁾は処理と培養日数によって大きく異なりました(図 2b)。IF1.5 区と PB2.25 区において互いに同等で最も高いフラックスを記録しました。PB1.5 区では IF1.5 区や PB2.25 区と比較して有意に低い値でしたが、NG 区よりは高い値を示しました。7 日目にはフラックスは減少しました。なお、PB1.5 区、PB2.25 区、IF1 区、および IF1.5 区は NG 区よりも有意に高いままでしたが、IF1.5 区を除いて肥料処理間で有意差は観察されませんでした。これらの結果は、IF が最も多く亜酸化窒素を排出するものの、PB も利用量を増やすと IF と同等のフラックスを誘発する可能性があることを示しています。ただし、PB 処理では排出量がより急速に減少する傾向にあり、IF と比較して累積亜酸化窒素フラックスが減少する可能性を示唆しています。

さらに、亜酸化窒素フラックスと硝酸態窒素放出量との相関分析を実施したところ、強い正の相関が観察され、亜酸化窒素フラックスが急速な硝化による硝酸態窒素の蓄積と密接に関連していることが確認されました(図 2c)。硝酸態窒素放出量が多い IF1 区と IF1.5 区では、亜酸化窒素フラックスが最も高く、PB1.5 区と PB2.25 区では、窒素無機化速度が遅いことと一致して、明らかに低い値を

示しました。これらの結果は、PB からの無機態窒素放出を制御することで、窒素の利用可能性を植物の吸収量に合わせるだけでなく、過剰な硝化作用による亜酸化窒素フラックスを抑制し、従来の無機肥料と比較して作物の生産性と環境の持続可能性の両方を向上させることができることを示しています。

PB 継続利用による土壌の化学的性質の変化の知見を得るために、連用試験ほ場において土壌水素イオン指数 (pH)、EC 値^[10]、土壌無機窒素 (アンモニア態窒素、硝酸態窒素) を経時的に調査しました。土壌 pH は、両年とも全ての処理区において、最初の移植後 93 日目までわずかに低下し、シーズンの終わりに上昇するなど、各処理区とも同様の変動を示しましたが、IF 区は概して低い値を示し、2024 年の収穫後の土壌 pH は IF 区、PB1 区、PB2 区の順に低く、OF 区、NG 区で高い値となりました。EC 値は、施肥時期に対応した変動は認められましたが、両年とも収穫後においては有意な差は認められませんでした。土壌無機窒素に関しては両年ともおおむね、施肥時期、気象環境に対応した変動を示しましたが、収穫後、PB2 と IF が NG と有意に異なることを示しており (図 3)、継続的な利用により残留土壌の無機態窒素が処理依存的に増加することを示しています。これらの結果は、PB (特に IF の 2 倍の窒素を含む PB2) は IF の施肥効果に匹敵し、PB は時間の経過とともに土壌の無機窒素を増加させる点で同量の窒素を含む OF と同程度の施肥効果を示すことを示唆しています。PB が土壌の健康を向上させながら農作物の持続可能な窒素源として機能する可能性が示されました。

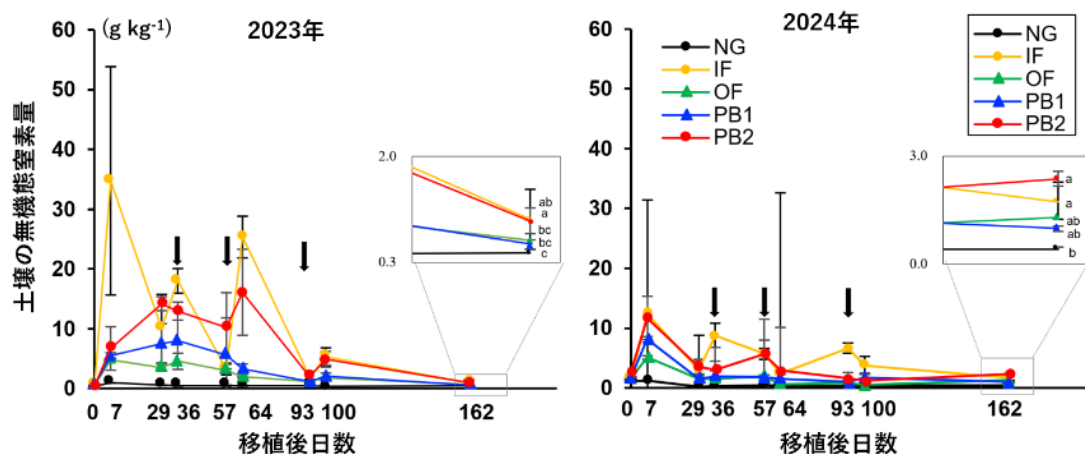


図 3 PB 連用試験ほ場でのブロッコリー栽間中 (2023 年、2024 年) の土壌無機態窒素の推移
無機態窒素量はアンモニア態窒素と硝酸態窒素の合計値 (土壌 1kg 当たりの窒素量 (g))。グラフ中の挿入図は収穫後の調査結果を拡大表示したもので、施肥処理が土壌養分状態に及ぼした残効 (ざんこう: 収穫後に残された影響) を表している。基肥は 0 日目に利用し、移植後 32 日、68 日、105 日にそれぞれ第 1 回、第 2 回、第 3 回の追肥を行った (黒矢印で表示)。各データ点は 3 反復 (n=3) の平均値であり、各反復は区画内の 3 地点から採取した混合土壌サンプルに基づいている。エラーバーは平均標準誤差を示す。異なるアルファベットは、Tukey の HSD 検定で施肥処理間に有意差 ($p < 0.05$) があることを示す。

今後の期待

本研究では、*R. sulfidophilum* 由来の PB が従来の有機肥料や無機肥料の代替

として機能し、ブロッコリーの収量を向上させ、土壌の肥沃度（ひよくど）を維持し、亜酸化窒素の排出量を削減できることを示しました。窒素固定能力を有する *R. sulfidophilum* は、再生可能な窒素源としての大きな可能性があります。PB からの窒素無機化は無機肥料よりも緩やかに起こりますが、この緩やかな放出特性は、長期的な施肥管理と亜酸化窒素の排出量削減に有利です。土壌培養実験において、培養初期段階では、PB は同量の窒素を無機肥料で供給した場合と比較して、亜酸化窒素排出量の削減率が 70% を超える結果が得られました（処理窒素量が 3 分の 2 の場合は最大 41%）。これらの結果は、PB がより環境に優しい窒素源として有望であることを示しています。

今後の研究では、さまざまな環境条件下で施肥効果と亜酸化窒素の排出量削減を最大化するために、PB の形状や施肥量を含む利用システムの最適化に焦点を当てる必要があります。持続可能な農業システムにおいて、従来の有機質肥料や無機肥料に代わる実用的で環境フレンドリーな代替品としての PB の役割を完全に確立するには、長期的なほ場試験と費用対効果分析が重要です。

本成果を受けて、スズキ株式会社および Suzuki R&D Center India (SRDI) との共同研究により実証実験を進めています。

今回の研究成果は、国際連合が定めた 17 項目の「持続可能な開発目標 (SDGs) ^[11]」のうち「2. 飢餓をゼロに」や「13. 気候変動に具体的な対策を」、「15. 陸の豊かさも守ろう」などへの貢献が期待されます。

論文情報

<タイトル>

Effects of marine purple bacterial fertilizer on mineralization, nitrous oxide emissions and broccoli yield

<著者名>

Shruthi, Shamitha Rao Morey Yagi, Dao Duy Hanh, Takahiro Maki, Kumiko Ochiai, Yu Iwahashi, Kazuki Murata, Makoto Shibata, Hiromu Inoue, Ryohei Nakano, Tetsuya Nakazaki & Keiji Numata

<雑誌>

npj Sustainable Agriculture

<DOI>

10.1038/s44264-026-00174-5

補足説明

[1] C/N 比

有機物や堆肥・土壌改良材などに含まれる炭素 (C) の量を窒素 (N) の量で割った「C : N の比率」を表す指標で、一般に、値が低いほど有機態窒素の分解が速く、高いほど分解が遅いことを意味する。

[2] 酵素反応速度論的解析

酵素反応の速度を基質濃度や酵素濃度、温度、水素イオン指数 (pH) などの条件と結び付けて数理モデルを用いて解析する手法。本研究では、有機態窒素の無機化の動態

を温度の関数とする数式を適用した。

[3] 紅色非硫黄細菌

光を利用してエネルギーを得るが硫黄化合物を主な電子供与体としない紅色の光合成細菌の一群であり、窒素固定や有機酸利用など多様な代謝能を持つ。

[4] 独立栄養

無機物（二酸化炭素・水・無機塩など）から自分で有機物を合成して生育に必要なエネルギーを得る栄養様式。

[5] 従属栄養

生育に必要なエネルギーとして他の生物がつくった有機物を利用する栄養様式。

[6] 土壌培養実験

土壌中の微生物や植物の生育反応を、採取した土壌を実験室などで管理された条件下に置き、その変化を観察・測定する実験。本件研究では、アンモニア態窒素、硝酸態窒素および亜酸化窒素について計測した。

[7] 活性化エネルギー (E_a)

化学反応が進行するために反応物が越えなければならないエネルギーの「壁」の高さ（反応物と遷移状態のエネルギー差）を表す。本研究では、加工バイオマス（PB）の多様な温度条件下での無機化速度を算出する式の定数として用いられた。

[8] SPAD 値

葉緑素計（SPAD メーター）で測定した葉の緑色の濃さを示す無次元の指標で、主に作物葉中のクロロフィル量や窒素栄養状態を推定するための数値。

[9] 亜酸化窒素フラックス

ここでの亜酸化窒素（ N_2O ）フラックスとは、土壌から大気中へ放出される、または吸収される亜酸化窒素の単位面積当たりの量。温室効果ガスであるため、農地における発生量評価で重要な指標とされる。

[10] EC 値

水や土壌中に溶けている肥料成分（イオン）の総量を電気の通しやすさとして数値化した指標で、値が高いほど肥料濃度（塩類濃度）が高いことを示す。

[11] 持続可能な開発目標（SDGs）

2015 年 9 月の国連サミットで採択された「持続可能な開発のための 2030 アジェンダ」にて記載された 2016 年から 2030 年までの国際目標。持続可能な世界を実現するための 17 のゴール、169 のターゲットから構成され、発展途上国のみならず、先進国自身が取り組むユニバーサル（普遍的）なものであり、日本としても積極的に取り組んでいる（外務省ホームページから一部改変して転載）。

理化学研究所 環境資源科学研究センター バイオ高分子研究チーム
 チームディレクター 沼田圭司 (ヌマタ・ケイジ)
 (京都大学 大学院工学研究科/地球環境学堂 教授)

京都大学

大学院工学研究科

特定研究員 シュルティ (Shruthi)
 特定助教 シャミタ・ラオ・モレーヤギ (Shamitha Rao Morey-Yagi)
 (理研 環境資源科学研究センター バイオ高分子研究チーム 客員研究員)
 特定研究員 (研究当時) ダオ・ハン・デュイ (Dao Duy Hanh)

大学院農学研究科 附属農場

教授 中野龍平 (ナカノ・リョウヘイ)
 助教 牧 隆宏 (マキ・タカヒロ)
 助教 岩橋 優 (イワハシ・ユウ)
 助教 村田和樹 (ムラタ・カズキ)
 准教授 井上博茂 (イノウエ・ヒロモ)

大学院農学研究科

助教 落合久美子 (オチアイ・クミコ)
 助教 柴田 誠 (シバタ・マコト)

成長戦略本部

特任教授 中崎鉄也 (ナカザキ・テツヤ)

研究支援

本研究は、科学技術振興機構 (JST) 共創の場形成支援プログラム (COI-NEXT) 「ゼロカーボンバイオ産業創出による資源循環共創拠点 (プロジェクトリーダー: 沼田圭司、JPMJPF2114)」による支援を受けて行われました。

発表者・機関窓口

<発表者>

理化学研究所 環境資源科学研究センター バイオ高分子研究チーム
 チームディレクター 沼田圭司 (ヌマタ・ケイジ)
 (京都大学 大学院工学研究科/地球環境学堂 教授)

京都大学

成長戦略本部

特任教授 中崎鉄也 (ナカザキ・テツヤ)

大学院農学研究科 附属農場

教授 中野龍平 (ナカノ・リョウヘイ)

<JST 事業に関する問い合わせ>

科学技術振興機構 イノベーション拠点推進部 推進第2グループ

瀧澤浩史（タキザワ・ヒロシ）

Tel: 03-6272-5808

Email: platform@jst.go.jp

<機関窓口>

理化学研究所 広報部 報道担当

Tel: 050-3495-0247

Email: ex-press@ml.riken.jp

京都大学 広報室 国際広報班

Tel: 075-753-5727

Email: comms@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel: 03-5214-8404

Email: jstkoho@jst.go.jp
