

2025 年 2 月 17 日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

N₂O₅ ガスの作用機序を光るシロイヌナズナで解明 ～プラズマによるオンサイトガス合成技術とのタッグで循環型農業へ～

【発表のポイント】

- 細胞活動で重要なカルシウムイオン(Ca²⁺)^(注 1)のバイオセンサー(GCaMP)^(注 2)遺伝子を組み込んだ「光る」シロイヌナズナを用いて、N₂O₅(五酸化二窒素)ガス^(注 3)にさらされること(暴露)で誘導される Ca²⁺シグナルを可視化することに成功しました。
- N₂O₅ ガスの暴露部位からカルシウムイオン(Ca²⁺)シグナルが発生し、時間とともに伝搬していくことが確認されました。
- N₂O₅ ガスに直接暴露されていない葉においても防御関連遺伝子の発現がみられたことから、部分的な処理であっても植物病害を抑制できる可能性が見出されました。

【概要】

無水硝酸とも呼ばれる N₂O₅ は、殺菌、治療、医薬品合成、材料合成への活用など、多くの可能性を秘めた窒素化合物です。東北大学大学院工学研究科・非平衡プラズマ学際研究センターの佐々木渉太助教、高島圭介助教(研究当時)、金子俊郎教授は、これまでの研究で、空気のみを原料として N₂O₅ を選択的にオンサイト合成するプラズマ装置の開発に成功し、N₂O₅ ガスをさまざまな植物に暴露する実験で、免疫が活性化すること、有用な二次代謝産物^(注 4)の合成を誘導すること、N₂O₅ ガス自体が気体窒素肥料として機能することなどを明らかにしてきました。ただし、なぜこのような植物応答が N₂O₅ ガスによって引き起こされるのかはよくわかっていませんでした。

今回、金子教授らは、同大大学院生命科学研究科の東谷篤志教授、埼玉大学大学院理工学研究科の豊田正嗣教授とともに、植物は N₂O₅ ガスに暴露されると、Ca²⁺シグナリング経路が活性化し、その情報を全身に伝える機構を有していることを明らかにしました。これは、先行して見出された N₂O₅ の様々な有用効果のメカニズムの解明につながる成果です。

本成果は科学誌 PLOS ONE に 2025 年 2 月 6 日付けで掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

東北大学大学院工学研究科・非平衡プラズマ学際研究センターの佐々木渉太助教、高島圭介助教(研究当時)、金子俊郎教授は、空気のみを原料として N_2O_5 を選択的にオンサイト合成するプラズマ装置の開発に成功し(参考文献 1)、本学が独自に支援する世界を先導する研究フロンティア開拓のためのプロジェクト「新領域創成のための挑戦研究デュオ～ Frontier Research in Duo(FRiD)～」の一つとして部局横断的な共同研究を進めてきました。これまでに、さまざまな植物に対して N_2O_5 ガスを暴露することで、植物免疫を活性化すること(参考文献 2)、有用な二次代謝産物の合成を誘導すること(参考文献 3)、さらには N_2O_5 ガス自体が気体窒素肥料として機能すること(参考文献 4・5)などを明らかにしてきました。一方で、なぜこのような植物応答が N_2O_5 ガスによって引き起こされるのか、そのメカニズムの多くは不明でした。

今回の取り組み

研究グループは、 Ca^{2+} のバイオセンサー(GCaMP)遺伝子を組み込んだ「光る」シロイヌナズナを用いて、 N_2O_5 ガスの暴露により誘導される Ca^{2+} シグナルを可視化することに成功しました。1 枚の葉に対して N_2O_5 ガスを局所暴露したところ、暴露部位で 10 秒以内に Ca^{2+} シグナルが発生し、その後数分かけて全身に Ca^{2+} シグナルが伝搬していくことが明らかとなりました(図 1)。さらに、 N_2O_5 ガスに直接さらされてない葉において、防御関連遺伝子が有意に発現することがわかりました(図 2 D-F)。先行研究において、 N_2O_5 ガスの直接暴露がジャスモン酸ならびにエチレンを介したシグナル伝達経路を活性化し、植物に病害をもたらす灰色カビ病菌やキュウリモザイクウイルスの感染を抑制することを確認していますが、今回の成果により、局所的な処理であってもこのような免疫活性効果が得られる可能性を見出しました。

また、植物の防御応答に深く関連する *PDF1.2* という遺伝子の発現を調べたところ、オゾン(O_3)ガスや一酸化窒素(NO)/二酸化窒素(NO_2)の混合ガスではほとんど発現が見られなかったのに対し、 N_2O_5 ガスでは発現が顕著に見られました(図 2 G)。この結果から、今回確認された全身性の防御応答は、 N_2O_5 特有の効果によるものであることが新たに明らかとなりました。

今後の展開

これらの結果は、 N_2O_5 が引き起こす多様な有用効果のメカニズムの解明に寄与するだけでなく、新たな N_2O_5 ガス処理方法の提案にも役立つと考えられます。今回使用された N_2O_5 ガスをオンサイト合成するプラズマ技術は空気のみを原料とし、100W 以下の電力で動作するため、再生可能エネルギーを活用することで、持続的にどこでも稼働させることが可能です。 N_2O_5 ガスの処理により、植物病害防除、機能性成分の増産、さらに窒素施肥が実現できれば、持続可能な農業システムに大きく貢献すると期待されます。

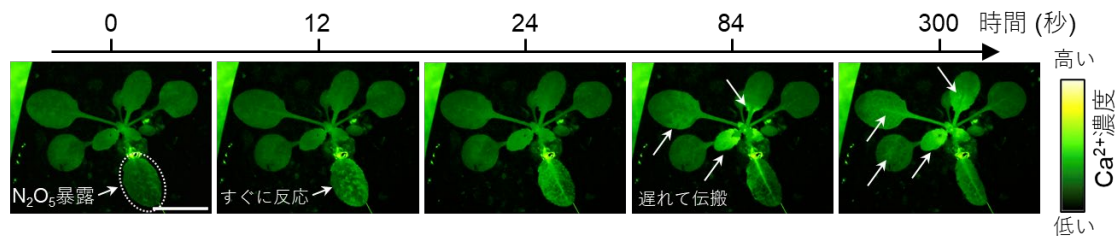


図 1. 1 枚の葉のみに N_2O_5 ガスを暴露した際に生じる Ca^{2+} シグナル伝搬。

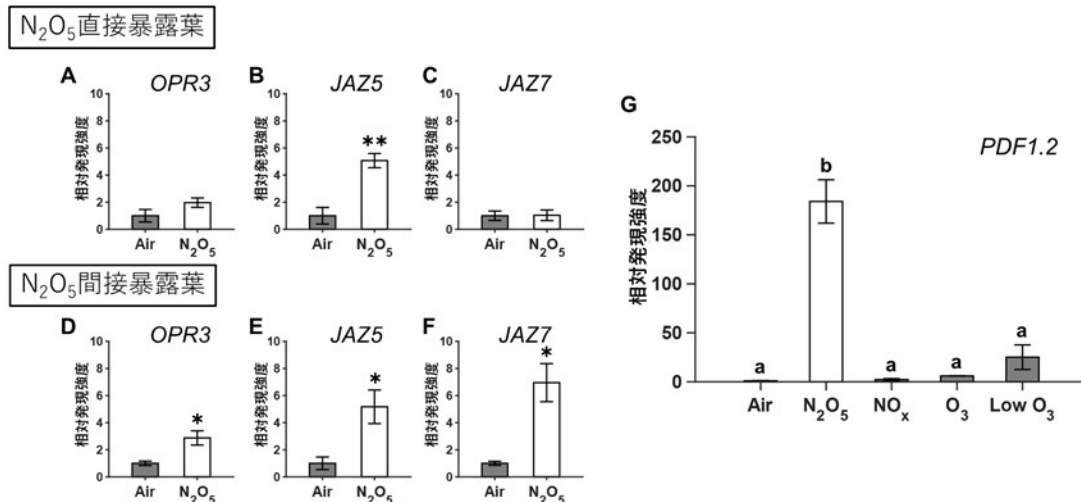


図 2. (A-F) N_2O_5 ガスが (A-C) 直接暴露あるいは (D-F) 間接暴露された葉で解析された植物防御応答関連遺伝子 (OPR3 ・ JAZ5 ・ JAZ7) の発現レベル (処理から 10 分後)。(G) さまざまな組成のガスで処理した後の植物防御応答関連遺伝子 (PDF1.2) の発現レベル (処理から 24 時間後)。

【謝辞】

本研究は世界を先導する研究フロンティア開拓のためのプロジェクト「新領域創成のための挑戦研究デュオ～ Frontier Research in Duo (FRiD) ～」の支援を受けて実施されました。また、本研究成果に関する論文は、「東北大学 2024 年度オープンアクセス推進のための APC 支援事業」の支援を受けました。

【用語説明】

注1. カルシウムイオン (Ca^{2+}) : 細胞内で遊離しているカルシウムイオンは、筋肉の収縮や神経活動をはじめとして、ほぼ全ての細胞活動に関与しています。一般的に、細胞内の Ca^{2+} 濃度は、細胞外よりも 1 万倍程度低く保たれており、細胞内 Ca^{2+} 濃度の変化は、次の生体反応を引き起こすスイッチとして機能したり、情報伝達の役割を担うことが知られています。

注2. バイオセンサー (GCaMP) : 緑色蛍光タンパク質 (GFP) に、 Ca^{2+} を結合するドメイン (領域) を融合したタンパク質。細胞内 Ca^{2+} と結合すると明るく緑色に光り

ます。

注3. N_2O_5 (五酸化二窒素) ガス: 酸素・窒素原子のみから構成される分子であり、無水硝酸とも呼ばれます。水と反応して硝酸 (HNO_3) を生じる過程で、非常に反応性が高いニトロニウムイオン (NO_2^+) を一時的に生じます。熱や水分に弱く保管が困難であることから、入手が難しくこれまでは広く使用されてきませんでした。

注4. 二次代謝産物: 生存や生殖に必須の糖、有機酸、アミノ酸、脂質など、種を越えて普遍的な化合物群を一次代謝産物とよび、生命維持には必須ではなく、生存に有利に働く多種多様な化合物を二次代謝産物と呼びます。種ごとに多様性がみられ、その総数は 20 万種類を超えるといわれています。植物の香り成分や生薬の成分、フラボノイド類などが有名です。

【参考文献】

1. S. Sasaki, K. Takashima, T. Kaneko, Portable Plasma Device for Electric N_2O_5 Production from Air. Ind Eng Chem Res. 2021;60: 798-801.

<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c04915>

2021 年 1 月 東北大学プレスリリース

<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2021/01/press20210105-02-n2o5.html>

2. D. Tsukidate, K. Takashima, S. Sasaki, S. Miyashita, T. Kaneko, H. Takahashi, et al., Activation of plant immunity by exposure to dinitrogen pentoxide gas generated from air using plasma technology. PLOS ONE. 2022;17: e0269863.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0269863>

2022 年 8 月 東北大学プレスリリース

<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2022/08/press20220801-01-plasma.html>

3. R. Tateishi, N. Ogawa-Kishida, N. Fujii, Y. Nagata, Y. Ohtsubo, S. Sasaki, et al., Increase of secondary metabolites in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) leaves by exposure to N_2O_5 with plasma technology. Sci Rep. 2024;14: 12759.

<https://doi.org/10.1038/s41598-024-63508-8>

2024 年 6 月 東北大学プレスリリース

<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2024/06/press20240617-02-n2o5.html>

4. T. Yamanashi, S. Takeshi, S. Sasaki, K. Takashima, T. Kaneko, Y. Ishimaru, et al., Utilizing plasma-generated N₂O₅ gas from atmospheric air as a novel gaseous nitrogen source for plants. Plant Mol Biol. 2024;114: 35.
<https://doi.org/10.1007/s11103-024-01438-9>

2024 年 4 月 東北大学大学院工学研究科 研究成果

<https://www.eng.tohoku.ac.jp/news/detail-,id,2853.html>

5. S. Takeshi, K. Takashima, S. Sasaki, A. Higashitani, T. Kaneko, Plasma nitrogen fixation for plant cultivation with air-derived dinitrogen pentoxide. Plasma Process Polym. 2024;21: e2400096.
<https://doi.org/10.1002/ppap.202400096>

【論文情報】

タイトル : Induction of systemic resistance through calcium signaling in Arabidopsis exposed to air plasma-generated dinitrogen pentoxide

著者 : Shota Sasaki^{#,*}, Hiroto Iwamoto[#], Keisuke Takashima, Masatsugu Toyota, Atsushi Higashitani^{*}, Toshiro Kaneko^{*} [#]Equally contribution

*責任著者 : 東北大学 大学院工学研究科 助教 佐々木 渉太

東北大学 大学院工学研究科 教授 金子 俊郎

東北大学 大学院生命科学研究科 教授 東谷 篤志

掲載誌 : PLOS ONE

DOI: 10.1371/journal.pone.0318757

URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0318757>

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学 大学院工学研究科

助教 佐々木 渉太

教授 金子 俊郎

TEL: 022-795-7046 Email: s.sasaki@tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学 大学院工学研究科

情報広報室 担当 沼澤 みどり

TEL: 022-795-5898 Email: eng-pr@grp.tohoku.ac.jp