

## エチレングスを持続的に放出できる固体材料を開発

～農産物の追熟や鮮度保持への応用に期待～

### ポイント

- ・エチレングスを簡便かつ持続的に放出できる固体材料の開発に成功。
- ・エチレングスの持続的放出により、ジャガイモの発芽が抑制されることを実証。
- ・農業・食品流通分野への応用に期待。

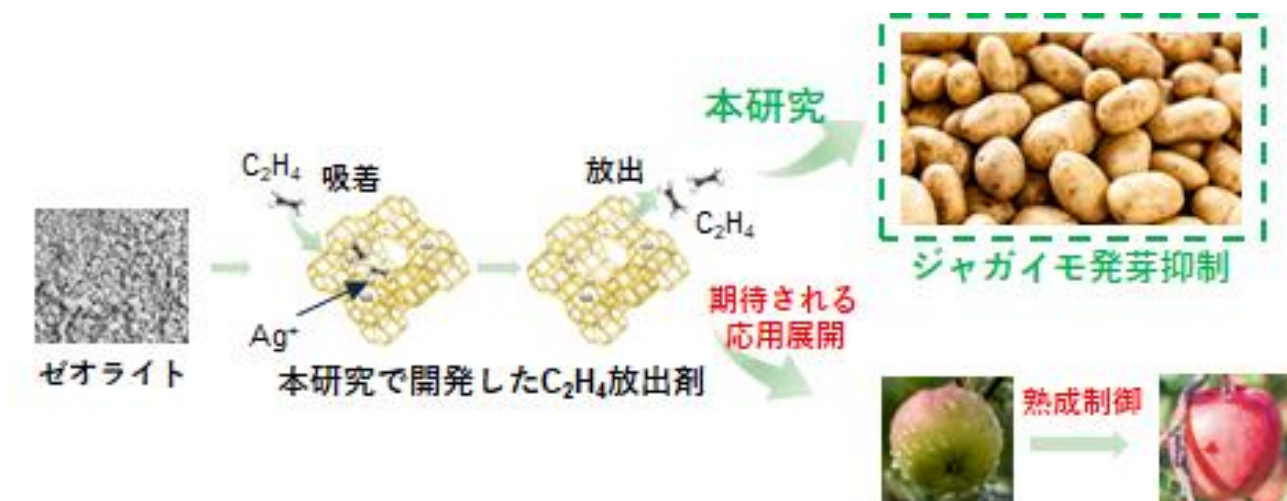
### 概要

北海道大学大学院地球環境科学研究院の黄 淵特任助教、神谷裕一教授、野呂真一郎教授と、近畿大学工学部応用化学科の山本 旭講師らの研究グループは、安価なゼオライト<sup>\*1</sup>を用いて植物ホルモンであるエチレン ( $C_2H_4$ ) を長期間放出できる固体材料を開発し、ジャガイモの発芽抑制に応用できることを実証しました。

$C_2H_4$  は、果実の熟成促進や植物の生理機能調節に関与する重要な植物ホルモンです。 $C_2H_4$  は気体分子であり、これまで  $C_2H_4$  の利用は主として加圧されたガスボンベに依存しているため、保管及び輸送時の安全性の観点から、より取り扱いが容易な手法が望まれていました。

本研究では、 $C_2H_4$  を多孔性<sup>\*2</sup>固体材料である銀イオン交換ゼオライトの微細な細孔内部に取り込ませ、その後持続的に放出できることを確認しました。また、Ag イオン交換ゼオライトを用いてジャガイモの発芽抑制実験を行ったところ、市販の  $C_2H_4$  放出剤よりも優れた発芽抑制効果を示しました。本成果は、果物や野菜の鮮度保持、熟成制御、食品流通プロセスの高度化に向けた基盤技術としての展開が期待されます。

本研究成果は、2026 年 1 月 15 日（木）公開の ACS Applied Nano Materials 誌にオンライン掲載されました。



ゼオライトを用いた  $C_2H_4$  固体放出剤の開発と応用

## 【背景】

エチレン ( $C_2H_4$ ) は、リンゴやトマトなどの追熟型<sup>\*3</sup> 果実や野菜の成熟過程において重要な役割を果たす天然の植物ホルモンです。これら追熟型農産物の保存期間を延長するためには、貯蔵や輸送の過程で過熟や腐敗を抑制することが不可欠であり、その対策の一つとして空間中から  $C_2H_4$  を除去する技術がこれまで広く検討されてきました。

一方で、別の観点から見ると、追熟型農産物を未熟な段階で収穫し、貯蔵及び輸送中に適切な人工熟成を施すことにより、腐敗を抑えつつ新鮮な果実・野菜を消費者に提供することが可能となります。また、 $C_2H_4$  の圃場利用は、温室栽培における作物の種子発芽や開花促進にも有効であることが知られています。さらに、 $C_2H_4$  は非追熟型作物に対しても有益であり、例えば、適切な  $C_2H_4$  曝露によってジャガイモの発芽が効果的に抑制されることが報告されています。このように  $C_2H_4$  には多様な農業分野において高い応用可能性を有しています。

現在、気体分子である  $C_2H_4$  の利用は、主として加圧  $C_2H_4$  ボンベに依存しています。しかし、加圧ボンベは安全性や操作性の観点から使用場所が限られるという課題があります。これに対して、固体材料を用いる手法は、安全性及び操作性の面で加圧ボンベよりも優れており、専門知識を持たない人が扱う場面や、輸送時など、これまで利用が難しかった環境での利用が期待されます。これまでに、 $\alpha$ -シクロデキストリン<sup>\*4</sup> ( $\alpha$ -CD) を用いて  $C_2H_4$  を内包・放出する手法が報告されていますが、この方法には調製及び操作が比較的複雑であるという課題があります。そのため、より合成が容易で、実用性に優れた新たな固体材料の開発が強く求められています。

## 【研究手法】

研究グループは、 $C_2H_4$  を取り込み可能な材料として、安価な多孔性のゼオライトに着目しました。また、 $C_2H_4$  を持続的に放出するためには、 $C_2H_4$  分子を適度な強さで材料中に固定することが重要であると考え、Ag イオン交換ゼオライトを活用する戦略を立案しました。

銀イオンは、 $C_2H_4$  のような構造中に二重結合をもつ分子と  $\pi$  錯体<sup>\*5</sup> を形成します。その結果、二重結合をもつ分子を強く固定することが可能となります。この  $\pi$  錯体形成を利用することにより、 $C_2H_4$  を細孔中に固定できると考えました。本研究では、骨格構造の異なる複数の市販ゼオライトを用い、Ag 導入量の異なる Ag イオン交換ゼオライトを調製しました。これらの試料を用いて、Ag 導入量及びゼオライト骨格構造が  $C_2H_4$  の吸着量に及ぼす影響を系統的に評価し、 $C_2H_4$  の持続的放出を可能とする Ag イオン交換ゼオライトの設計指針を明らかにしました。

さらに、Ag イオン交換ゼオライトによる農産物への応用を検証するため、ジャガイモの発芽抑制効果を調べました。

## 【研究成果】

Ag イオン交換ゼオライトでは、ゼオライトの骨格構造によらず、すべての試料において強く固定された  $C_2H_4$  の存在が認められました。一方で、Ag イオンを交換していないゼオライトは  $C_2H_4$  を吸着するものの、 $C_2H_4$  との相互作用が弱く、吸着した  $C_2H_4$  は真空引き処理によって容易に脱離することを確認しました。また、強く固定された  $C_2H_4$  量（以下、 $C_2H_4$  量と表記）と Ag イオン導入量の間には明確な相関が確認され、Ag イオン導入量の増加に伴い、ある範囲までは  $C_2H_4$  量が増加する傾向を示しました。一方で、Ag イオン導入量をさらに増加させても、 $C_2H_4$  量の顕著な増加は認められませんでした。

さらに、ゼオライトの骨格構造も  $C_2H_4$  量に影響を及ぼすことが明らかとなりました。特に、Ag イ

オン交換 A 型ゼオライト<sup>\*6</sup>は、同程度の Ag イオン導入量を有する X 型ゼオライト<sup>\*7</sup>と比較して、著しく小さい C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 量を示しました。詳細な評価から、Ag イオン導入量が過剰になると、Ag イオンが凝集しやすくなり、孤立した Ag イオンとして存在しなくなることが示されました。このように凝集した Ag 種は C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> を強く固定できないため、Ag イオン導入量を増加させても C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 量が増加しなかったものと考えられます。

本研究で検討した市販ゼオライトの中で、適切な Ag イオン含有量を有する Ag イオン交換 X 型ゼオライトが、市販 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 放出剤よりも遥かに高い C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 量を示しました（図 1 左）。また、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 放出能を比較したところ、市販 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 放出剤と比較して Ag イオン交換 X 型ゼオライトは優れた持続的 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 放出能を示すことが明らかとなりました（図 1 右）。

最も性能の良かった Ag イオン交換 X 型ゼオライトを用いてジャガイモの発芽抑制効果を検証したところ、図 2 のように本研究で開発した Ag イオン交換 X 型ゼオライトは市販の C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 放出剤よりもジャガイモの発芽を抑制できることが分かりました（図 2）。

### 【今後への期待】

本研究では、持続的な C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 放出を可能とする Ag イオン交換ゼオライトの設計指針を明らかにするとともに、その農産物鮮度制御への有効性をジャガイモの発芽抑制効果によって実証しました。Ag イオン交換ゼオライトにおける C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> の持続的な放出特性は、果物や野菜の鮮度保持や熟成制御をはじめ、農産物の流通・保管プロセスの高度化など、幅広い農業分野への応用が期待されます。さらに、本研究で得られた知見は、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> に限らず、他の小分子の放出制御にも適用可能であり、医学や衛生分野を含む様々な分野への応用に貢献することが期待されます。

### 【謝辞】

本研究は公益財団法人 JKA 競輪とオートレースの補助事業、スタートアップ総合支援プログラム（SBIR 支援）（JPJ010717）の支援を受けて実施されました。

## 論文情報

論文名 Zeolite X Loaded with  $\text{Ag}^+$  as a Slow Ethylene-Releasing Nanoporous Material to Suppress Potato Sprouting (ジャガイモの発芽を抑制するエチレンを緩やかに放出するナノ多孔性材料としての銀イオン担持ゼオライト X)

著者名 黄 淵<sup>1,2</sup>、山本 旭<sup>3</sup>、大友亮一<sup>1</sup>、野呂真一郎<sup>1</sup>、神谷裕一<sup>1</sup> (<sup>1</sup>北海道大学大学院地球環境科学研究院、<sup>2</sup>北海道大学大学院環境科学院、<sup>3</sup>近畿大学理工学部応用化学科)

雑誌名 ACS Applied Nano Materials (ナノ材料応用学の専門誌)

D O I 10.1021/acsanm.5c05148

公表日 2026 年 1 月 15 日 (木) (オンライン公開)

## お問い合わせ先

北海道大学大学院地球環境科学研究院 教授 野呂真一郎 (のろしんいちろう)

T E L 011-706-2272 メール [noro@ees.hokudai.ac.jp](mailto:noro@ees.hokudai.ac.jp)

U R L <https://www.ees.hokudai.ac.jp/ems/stuff/noro/index.html>

## 配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール [jp-press@general.hokudai.ac.jp](mailto:jp-press@general.hokudai.ac.jp)

近畿大学経営戦略本部広報室 (〒577-8502 東大阪市小若江 3 丁目 4-1)

T E L 06-4307-3007 F A X 06-6727-5288 メール [koho@kindai.ac.jp](mailto:koho@kindai.ac.jp)

## 【参考図】

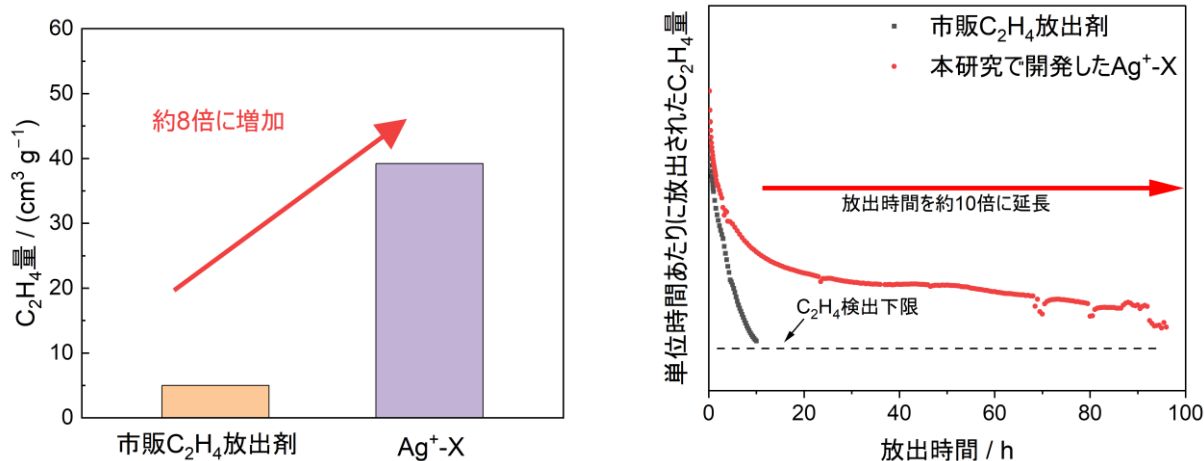


図 1. 本研究で開発した放出剤 ( $\text{Ag}^+$ -X) と市販  $\text{C}_2\text{H}_4$  放出剤の強く固定された  $\text{C}_2\text{H}_4$  量及び放出性能の比較

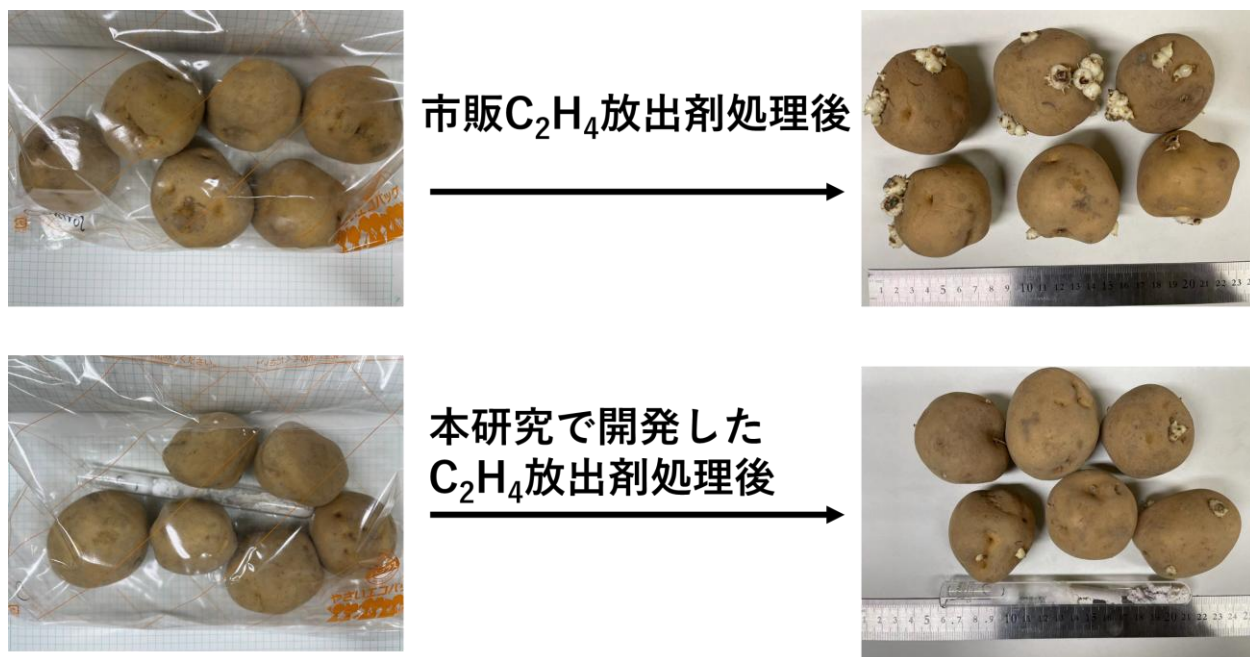


図 2. 本研究で開発した放出剤 ( $\text{Ag}^+\text{-X}$ ) と市販  $\text{C}_2\text{H}_4$  放出剤のジャガイモ発芽抑制性能の比較

#### 【用語解説】

- \*1 ゼオライト … 規則的なナノサイズの微細孔（小さな空間）をもつアルミノケイ酸塩鉱物のこと。
- \*2 多孔性 … 物質内部にナノメートルサイズの細孔（小さな空間）を多数もつ性質のこと。
- \*3 追熟型 … リンゴやトマトのように、収穫後も成熟が進行するタイプの作物のこと。
- \*4  $\alpha$ -シクロデキストリン … トウモロコシでんぷんから作られる環状オリゴ糖のこと。
- \*5  $\pi$  錯体 … 金属が有機分子の二重結合や芳香環に広がった電子と相互作用してできる結合状態のこと。
- \*6 A型ゼオライト … 比較的小さな細孔をもち、低 Si/Al 比を特徴とするゼオライトのこと。
- \*7 X型ゼオライト … Si/Al 比は A 型ゼオライトに近いが、大きな細孔をもつゼオライトのこと。