調査・報告

エタノールが野菜を暑さや乾燥から守る ～EGAO技術が拓く気候変動時代の農業～

国立研究開発法人　理化学研究所　環境資源科学研究センター　特別研究員　山根　美代
国立研究開発法人　理化学研究所　環境資源科学研究センター　研究員　戸高　大輔
近畿大学農学部　生物機能科学科　講師　佐古　香織
国立研究開発法人　理化学研究所　環境資源科学研究センター　チームディレクター　関　原明

【要約】

近年、気候変動に伴う高温や乾燥などの環境ストレスが農作物の生育や収量に深刻な影響を及ぼしている。われわれは、低濃度のエタノールを植物に投与することで、植物が本来備える環境ストレスへの適応能力を高めるEGAO（Ethanol-based Global Agricultural Optimization）技術の開発を進めている。本技術により、レタスやトマトにおいて高温ストレスによる生育への影響が軽減されることを確認しており、その背景には小胞体ストレス応答や活性酸素の蓄積抑制、糖代謝など複数の仕組みが関与すると考えられる。現在は、圃場におけるエタノール処理条件の最適化や安全性、環境への影響評価、栽培支援システムの開発を進め、気候変動下における持続的な農業生産への社会実装を目指している。

1　はじめに

近年、わが国では夏季の高温が顕著となっている。気象庁によると、2023年および24年６～８月の平均気温は、平年値（1991～2020年平均）を1.76度上回り、2025年には2.36度上回って、1898年の統計開始以降で最も高い値を記録した。2026年も平年値を1.02度上回り、統計開始以降５番目に気温が高い夏となった[1)]。特に25年は、記録的な高温に加えて、北・東日本太平洋側で降水量がかなり少なく、高温と少雨が同時に生じた地域も見られた[2)]。

こうした高温や少雨は、わが国の農作物生産にも影響を及ぼしている。例えば、25年産たまねぎの10アール当たり収量は3790キログラムと前年を16％下回り、全国の収穫量も92万2000トンと18％減少した。農林水産省は、この主な要因として、最大の産地である北海道において、６月中旬からの高温と6月下旬からの少雨により生育が停滞し、球の肥大が抑制されたことを挙げている[3)]。また、25年産春植えばれいしょでは、全国の10アール当たり収量が3100キログラムと前年産を６％下回り、収穫量は207万4000トンと８％減少した。北海道では、６月の高温により、着いも数の減少に加え、いもの肥大期に少雨であったことが影響して小玉傾向となり、10アール当たり収量は前年を９％下回った[4)]。

高温の影響は、収量形成に関わるさまざ

まな生理過程にも及ぶ。農林水産省の令和７年地球温暖化影響調査では、トマトにおいて高温による着花・着果不良が広く報告され、その発生面積は全国の作付面積の４～５割、西日本では５～６割に達した[5)]。トマトでは、開花前の比較的短期間の高温ストレスであっても、その後の着果や果実成長に影響することが実験的にも示されている[6)]。

今後も高温や乾燥などの環境ストレスが農作物の安定生産を制約することが懸念される中、遮光や冷却、かん水、高温耐性品種の導入などの栽培技術に加え、植物が本来備えている環境ストレスへの適応能力を活用した新たな対策技術の開発も重要である。本稿では、低濃度エタノールを利用して植物の環境ストレス耐性向上を図るEGAO技術について、その概要と野菜への応用に向けた取り組みを紹介する。

２　EGAO技術とは

（１）ケミカルプライミング

植物は、高温や乾燥、塩害などから物理的に逃避することができないため、それらの環境変化に応じて、自らの生理状態や代謝を変化させるさまざまな仕組みを備えている。こうした植物自身が有する環境ストレスへの適応能力をあらかじめ引き出しておく方法の一つが「プライミング」である。中でも、特定の化学物質を植物に与えることによって、その後に受ける環境ストレスへの適応を高める手法は「ケミカルプライミング」と呼ばれる。これまでに、アミノ酸、植物ホルモン、有機酸など、さまざまな物質にプライミング効果があることが報告されている[7)]。ケミカルプライミングは、植物が本来備えている環境ストレスへの適応能力を利用する点に特徴があり、環境ストレス耐性品種の育成などとは異なる方向から、作物の安定生産に寄与する技術として研究が進められている。

（２）エタノールによる環境ストレス耐性の向上

われわれは、環境ストレス耐性を向上させるケミカルプライミング物質の探索を進める中で、エタノールが有効であることを見いだした[8)]。エタノールは、消毒や食品添加物などに広く利用されている身近な物質であり、安価で入手しやすいという特徴を有する。これまでに、実験用モデル植物であるシロイヌナズナをはじめ、農作物であるイネ、コムギ、キャッサバなどを用いた研究により、乾燥、塩、強光、高温、低温などさまざまな環境ストレスに対して、エタノール処理によりストレス耐性が向上することを明らかにしてきた。われわれは、この低濃度エタノールを利用した農作物の環境ストレス耐性を高める技術を、「Ethanol-based Global Agricultural Optimization」（EGAO（えがお））と名付け、農業生産への応用に向けた研究を進めている。

３　野菜栽培への応用

（１）レタスにおける効果

EGAO技術による高温ストレスへの耐性向上効果が野菜にも応用できるかどうかを検証するため、葉物野菜であるレタスを用いて試験を行った。まず、ポットで３週間栽培したレタスに20mM（注）（約0.12%）のエタノール水溶液を根から３日間吸水させた後、エタノール処理の効果を明瞭に検

証するため、実際の栽培環境よりも厳しい50度で３時間の高温処理を行った。その後、通常の温度に戻して生育を観察したところ、エタノールを与えなかったレタスに比べて、あらかじめエタノールを与えたレタスでは、高温による葉の生育抑制が軽減された[9)]。

この結果を踏まえ、実験室内で設定された高温条件下で認められた効果が、気温などが変動する屋外の栽培環境においても得られるかどうかを検証するため、横浜市立大学の圃場において栽培試験を行った。外気温が高くない時期でも高温条件を再現するため、ビニールで覆われたトンネル内でレタスを栽培して試験を行った（図１A）。トンネル内部の最高気温は35 ～ 40度に達した（図１B）。エタノール処理区では、定植前に低濃度エタノールを根から吸収させるとともに、栽培期間中も２週間ごとに１株当たり100ミリリットルの低濃度エタノールを株元に灌注（かんちゅう）処理を行った。その結果、エタノール処理をしていないレタスと比較して、高温条件下における葉の生育低下が改善した（図１C）[9)]。

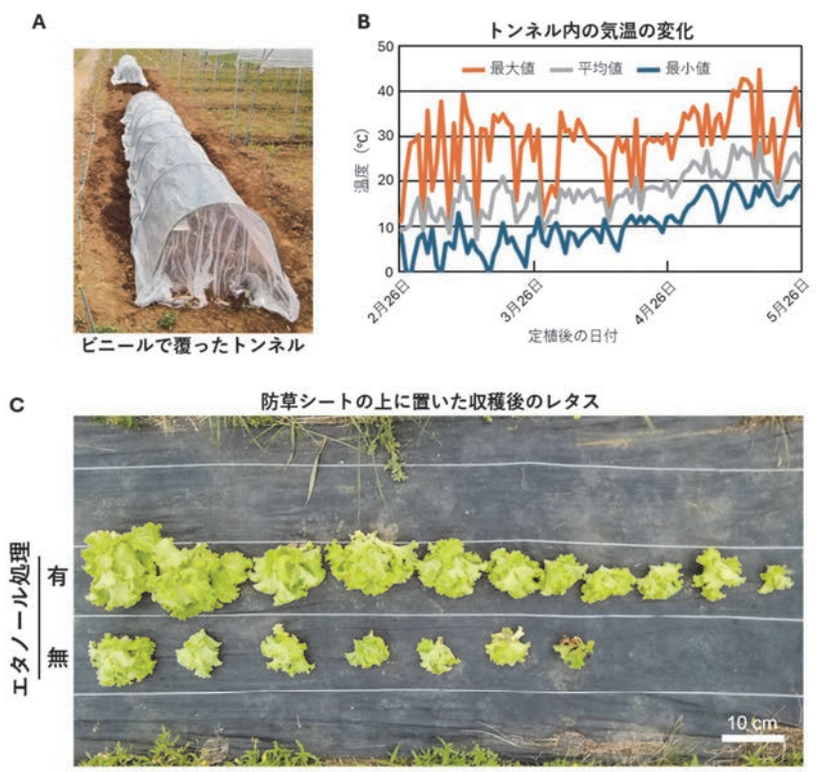
これらの結果は、野菜においても、低濃度エタノールの処理が高温による生育への影響を軽減できる可能性を示している。特に、農業現場に近い環境で栽培したレタスでも効果が認められたことは、エタノールを利用した高温対策技術を農業生産へ応用していく上で重要な結果である。

（注）mMはミリモーラーを指す。

（２）トマトにおける効果

われわれは、レタスで認められた低濃度エタノールによる高温ストレス耐性向上効

図１　レタスを用いた高温下での育成試験



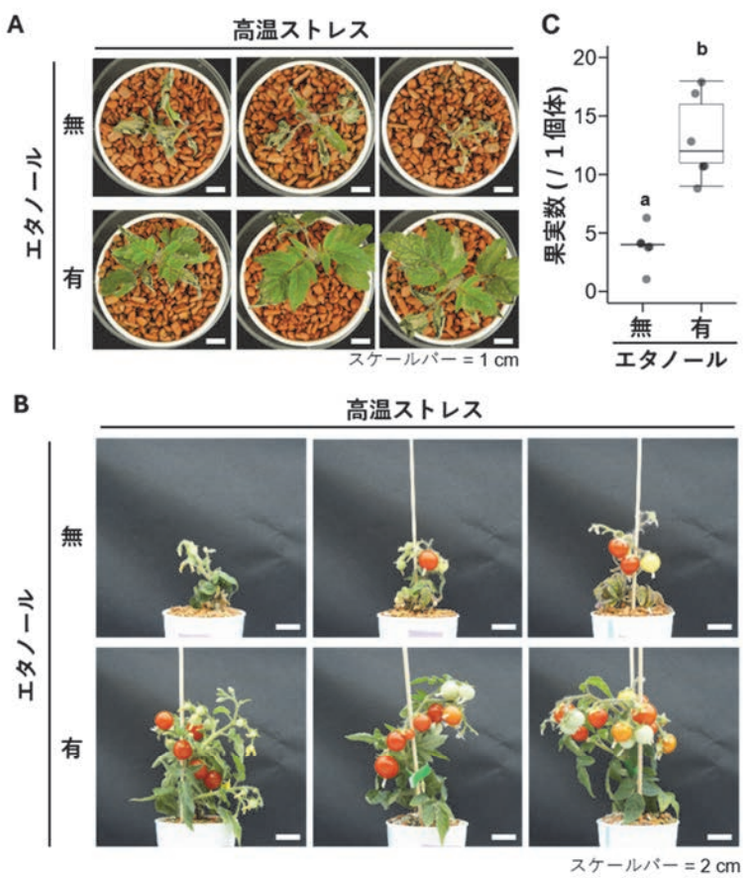
A.本試験で用いたビニールで覆ったトンネルの外観
　トンネル内で栽培することにより、周囲より高温となる栽培条件を設定した。
B.トンネル内の気温の変化
C.収穫後のレタス

果が、果菜類においても認められるかどうかを検証するため、トマトを用いた試験を行った。まず、実験用モデル品種であるマイクロトムを用いて、エタノール処理が通常の生育に及ぼす影響を調べた。20mM（約0.12%）のエタノール水溶液を３日間または６日間投与した場合、通常の栽培条件では葉の生育に明瞭な影響は認められなかった[10)]。そこで、20mMのエタノール水溶液を３日間投与した後、高温ストレスを与え、その効果を検証した。50度で４時間の高温処理を行った後、通常の栽培条件に戻して生育を観察した。その結果、エタノールを投与していない植物では高温によって葉が大きな障害を受けたのに対し、エタノールを事前に投与した植物では、高温処理後の緑色葉面積が大きいまま維持された（図２A）[10)]。このことから、エタノールの事前投与によって、高温による葉の生育障害が軽減されることが示された。

さらに、果実生産への影響についても調べた。エタノールを事前に投与したトマトに高温ストレスを与え、その後、通常条件で栽培を継続したところ、エタノール処理区では無処理区と比較して１株当たりの果実数が多くなった（図２B，C）[10)]。一方、１果当たりの新鮮重には、明瞭な差は認められなかった[10)]。これらの結果から、低濃度エタノールの事前投与は、高温による葉の生育障害だけでなく、果実形成への影響も軽減する可能性が示された。

また、農業現場での利用を見据えて、エ

図２　マイクロトムを用いた高温ストレス耐性試験



A.高温ストレス処理後の幼植物個体の様相
B.高温ストレス処理後の成熟個体の様相
C.高温ストレス処理後の成熟個体の果実数

タノールの処理方法についても検討を進めている。2025年には、筑波大学との共同研究により、エタノールを根から与えるのではなく、植物体に噴霧する方法でもトマトの高温ストレス耐性が向上することが示された[11]。加えて、エタノールを噴霧した植物では、果実の糖度やビタミンC含量などの向上も認められた[11]。

これらの結果から、低濃度エタノールによる高温ストレス耐性向上効果は、葉物野菜だけでなく果菜類でも認められ、その処理方法についても、農業利用に向けた選択肢が広がりつつある。

4　EGAO技術が植物を守る仕組み

（1）高温ストレスへの応答

高温ストレスにさらされた植物の細胞内では、さまざまな障害が生じる。その一つが、タンパク質の正常な折り畳みが妨げられることである。細胞内の「小胞体」と呼ばれる器官では、新しく合成されたタンパク質を正しい立体構造に折り畳む過程などが行われている。高温などの環境ストレスを受けると、この過程が正常に進まず、正しく折り畳まれていないタンパク質が小胞体内に蓄積する。この状態を「小胞体ストレス」と呼ぶ。植物には、このような状態を感知し、タンパク質を正常な状態に戻そうとする「小胞体ストレス応答（UPR）」と呼ばれる仕組みが備わっている。

われわれは、シロイヌナズナに低濃度エタノールを投与した際の遺伝子発現や代謝産物の変化を網羅的に解析した。その結果、小胞体ストレス応答に関わる遺伝子の働きが変化していることを見いだした[9]。さらに、小胞体ストレス応答を人為的に促進または抑制する実験を行ったところ、エタノールによる高温ストレス耐性の向上には、小胞体ストレス応答の活性化が重要であることが明らかになった[9]。

（2）活性酸素の蓄積抑制

小胞体ストレス応答に加えて、活性酸素の蓄積抑制もエタノールによるストレス耐性向上に重要な因子であると考えられる。高温や塩害などの環境ストレスにさらされると、植物の細胞内では活性酸素が過剰に発生する。活性酸素は細胞内の情報伝達にも利用されるが、過剰に蓄積すると細胞膜やタンパク質などを傷つけ、生育を阻害する。植物には、活性酸素を除去する酵素が備わっており、これらの働きを高めることがストレス耐性の向上につながると考えられている。われわれは、シロイヌナズナに低濃度エタノールを投与すると、活性酸素の一種である過酸化水素を除去する酵素関連の遺伝子発現が増加し、塩ストレス下での活性酸素の蓄積が抑制されることを明らかにした[8]。

同様に、トマトにエタノールを投与した場合にも、活性酸素の除去に関わる遺伝子の発現上昇が認められた[10]。このことから、活性酸素の蓄積を抑える仕組みも、エタノールによる高温ストレス耐性の向上に関与する可能性が考えられる。

（3）糖代謝との関係

エタノールは、植物体内に取り込まれて代謝されるという側面もあると考えられる。われわれは、炭素原子を安定同位体で標識したエタノールを植物の根から吸収させ、その後の代謝を解析した。その結果、エタノール由来の炭素が植物体内に取り込

まれ、酢酸などを経て、糖をはじめとするさまざまな代謝産物へと変換されることが明らかになった[12]。

このような代謝は、環境ストレス下における植物の生育維持にも関係すると考えられる。例えば乾燥条件では、植物は気孔を閉じて水分の損失を抑えるが、その一方で、光合成に必要な二酸化炭素の取り込みも減少する。エタノールを投与したシロイヌナズナでは、取り込まれたエタノールを利用した糖新生が活性化し、糖が蓄積することが示されている[12]。このような炭素代謝の変化が、乾燥条件下での生育維持に寄与すると考えられる。同様に、トマトにエタノールを投与した場合にも、グルコースやフルクトースなどの糖類の蓄積が認められた[10]。糖は、植物の生育に必要なエネルギーや炭素骨格の供給源となるだけでなく、環境ストレスへの適応にも関わる。このため、エタノール投与に伴う糖代謝の変化も、高温ストレス下で植物の生育を維持する仕組みの一つである可能性が考えられる。

5　おわりに―今後の展望―

これまでの研究から、低濃度エタノールによる環境ストレス耐性向上効果は、モデル植物だけでなく、レタスやトマトなどの作物でも確認されつつある。一方、この技術を実際の農業生産に利用するためには、作物や品種、栽培環境に応じたエタノールの濃度、施用方法、施用時期などを最適化し、圃場条件下でその効果や安全性を検証する必要がある。

そこで筆者らは、2026年度から内閣府の「研究開発とSociety 5.0との橋渡しプログラム（BRIDGE）」の下、「革新的なケミカルプライミング技術による気候変動に適応した持続的食料生産システムの実現」に取り組んでいる（https://www8.cao.go.jp/cstp/bridge/keikaku/r8-06_bridge_r8.pdf）。本プロジェクトでは、ダイズ、トマト、葉菜類を主な対象として、国内複数地域の圃場やハウスでEGAO技術を実証し、作物ごとの実用的な栽培プロトコルの確立を目指している。また、収穫物へのエタノールの残留や土壌微生物への影響などを調べ、安全性や環境への影響についても評価する。さらに、圃場試験から得られる生育・収量データを用いて作物の生育シミュレーションモデルを構築し、気象予報などの情報と組み合わせることで、それぞれの農地で、いつ、どの程度のエタノールを施用すればよいかを提示する栽培支援システムの開発にも取り組む。将来的には、猛暑や少雨が予想される際に、その地域や作物の生育状況に応じて適切な処理条件を提示できるような技術へ発展させることを目指している。EGAO技術を広く農業現場に普及させるためには、研究機関だけでなく、生産者、農業関係団体、地方自治体、企業などとの連携も不可欠である。そのため、BRIDGEでは、産学官によるクローズド研究会を構築し、栽培マニュアルの整備や農業資材の開発などを進め、研究成果を実際の農業生産へつなげていく計画である。

高温や乾燥などの環境ストレスを完全に避けて作物を生産することは難しい。耐性品種の利用、かん水、遮光などの既存技術に加えて、植物が本来備えている環境ストレスへの適応能力を低濃度エタノールによって引き出すEGAO技術を新たな選択肢の一つとして加えることで、気候変動下

における野菜の安定生産に貢献したいと考えている。「EGAO」は日本語の「笑顔」と同じ響きを持つ。気候変動による農作物への被害を少しでも軽減し、生産者から消費者まで多くの人々の「笑顔」につながる技術となることを目指して、研究開発を進めていきたい。

【引用文献・資料】
1）気象庁、日本の季節平均気温「日本の夏（６～８月）平均気温偏差の経年変化（1898～2026年）」
https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/sum_jpn.html
2）気象庁、2025年夏（６月～８月）の天候
https://www.data.jma.go.jp/cpd/longfcst/seasonal/202508/202508s.html
3）農林水産省、作物統計調査「令和７年産指定野菜（春野菜、夏秋野菜等）の作付面積、収穫量及び出荷量
https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_yasai/pdf/syukaku_syunka_25.pdf
4）農林水産省、作物統計調査「令和７年産春植えばれいしょの作付面積、収穫量及び出荷量」
https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_yasai/pdf/syukaku_barei_25.pdf
5）農林水産省、令和７年地球温暖化影響調査レポート
https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/attach/pdf/report-86.pdf
6）Ito, H., Kanayama, Y., Shibuya, T., Mohammed, S.A., Nishiyama, M. and Kato, K. (2022) Effect of short-term temperature stress on fruit set and the expression of an auxin reporter gene and auxin synthesis genes in tomato. Scientia Hortic 300:111039.
7）Bashir, K., Todaka, D., Sako, K., Ueda, M., Aziz, F. and Seki, M. (2025) Chemical Application Improves Stress Resilience in Plants. Plant Mol. Biol. 115:47
8）Nguyen, H.M., Sako, K., Matsui, A., Suzuki, Y., Mostofa, M.G., Ha, C.V., Tanaka, M., Tran, L.S.P., Habu, Y. and Seki, M. (2017) Ethanol Enhances High-salinity Stress Tolerance by Detoxifying Reactive Oxygen Species in Arabidopsis thaliana and Rice. Front. Plant Sci. 8: 1001
9）Matsui, A., Todaka, D., Tanaka, M., Mizunashi, K., Takahashi, S., Sunaoshi, Y., Tsuboi, Y., Ishida, J., Bashir, K., Kikuchi, J., Kusano, M., Kobayashi, M., Kawaura, K. and Seki, M. (2022) Ethanol induces heat tolerance in plants by stimulating unfolded protein response. Plant Mol. Biol. 110:131-145.
10）Todaka, D., Quynh, D.T.N., Tanaka, M., Utsumi, Y., Utsumi, C., Ezoe, A., Takahashi, S., Ishida, J., Kusano, M., Kobayashi, M., Saito, K., Nagano, A.J., Nakano, Y., Mitsuda, N., Fujiwara, S. and Seki, M. (2024) Application of ethanol alleviates heat damage to leaf growth and yield in tomato. Front. Plant Sci. 15:1325365.
11）Ahmed, R.A.H., Abdellatif, I.M.Y., Oka, N., Kobayashi, M., Fuhrmann-Aoyagi, M.B., Todaka, D., Seki, M. and Miura, K. (2025) Application of 4-CPA or ethanol enhances plant growth and fruit quality of phyA mutant under heat stress. Scientific Rep. 15: 32388.
12）Bashir, K., Todaka, D., Rasheed, S., Matsui, A., Ahmad, Z., Sako, K., Utsumi, Y., Vu, A.T., Tanaka, M., Takahashi, S., Ishida, J., Tsuboi, Y., Watanabe, S., Kanno, Y., Ando, E., Shin, K.C., Seito, M., Motegi, H., Sato, M., Li, R., Kikuchi, S., Fujita, M., Kusano, M., Kobayashi, M., Habu, Y., Nagano, A.J., Kawaura, K., Kikuchi, J., Saito, K., Hirai, M.Y., Seo, M., Shinozaki, K., Kinoshita, T. and Seki, M. (2022) Ethanol-mediated novel survival strategy against drought stress in plants. Plant Cell Physiol (Rapid Paper) 63:1181-1192.

【注意事項】
・エタノールは燃えやすいため、火気や高温を避け、換気の良い場所で使用してください。
・エタノールは直射日光や高温を避け、密閉して涼しい場所に保管してください。
・エタノールを大量に保管する場合は、事前に消防署へ確認してください。」



山根　美代（やまね　みよ）

国立研究開発法人　理化学研究所　環境資源科学研究センター　植物ゲノム発現研究チーム　特別研究員

【略歴】
2025年　国立研究開発法人理化学研究所に入所
EGAO技術によるシロイヌナズナや作物の環境ストレス耐性向上とその応用に関する研究に従事



戸高　大輔（とだか　だいすけ）

国立研究開発法人　理化学研究所　環境資源科学研究センター　植物ゲノム発現研究チーム　研究員

【略歴】
2021年　国立研究開発法人理化学研究所に入所
EGAO技術によるシロイヌナズナ、トマトの環境ストレス耐性向上に関する研究などに従事



佐古　香織（さこ　かおり）

近畿大学農学部　生物機能科学科　講師

【略歴】
2019年　近畿大学農学部に着任
EGAO技術による環境ストレス耐性メカニズム解明を目指した研究に従事



関　原明（せき　もとあき）

国立研究開発法人　理化学研究所　環境資源科学研究センター　植物ゲノム発現研究チーム　チームディレクター

【略歴】
1995年　国立研究開発法人理化学研究所に入所
植物の環境ストレス適応機構の解析、 EGAO技術等を活用した植物の環境ストレス耐性強化に関する研究、キャッサバを活用したカーボンニュートラルな循環型社会の実現に貢献する技術の開発などに従事