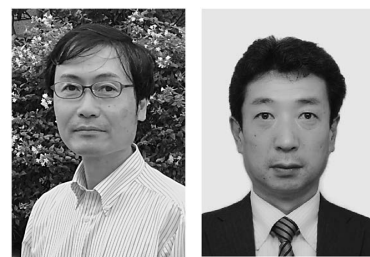


作物の高温耐性を高める揮発性バイオスティミュラント  
「すずみどり」の開発



神戸大学大学院農学研究科 山内 靖雄 ①  
株式会社ファイトクローム 河合 博 ②

はじめに

「異常気象」。最近ではこの言葉を聞かない年の方がむしろ異常と思えるほど、常態化していると実感されている方々も多いと思う。異常気象は人間社会の様々な面に影響をもたらしているが、植物に対しても当然のことながら多大な影響を与えている。現実的には農業界が異常気象の影響を直接的に受けている最大の被害業界の一つであり、毎年のように異常気象を原因とする減収が報道されている。それゆえ、作物を異常気象から保護する有効な対応策の開発は、農学研究に対し日本の農業界から切望されている喫緊の課題となっている。「バイオスティミュラント」は環境ストレス抵抗性を亢進させることにより作物の生産性を向上させる資材で、肥料、農薬に次ぐ第三の農業資材として注目されており、「すずみどり」は植物の生理機能を応用したバイオスティミュラントの一つである。本講演では、すずみどりの実用化に至る科学的基盤と製品化技術、また農業現場での実施例を紹介したい。

1. 植物の生育を左右する環境ストレス

植物は光や温度など、常に環境の変化に曝されて生きているため、元来柔軟な環境応答機構を備えているが、しばしば環境の変化が植物の許容を超えることがあり、それが植物の生育を阻害する環境ストレスとなる。環境ストレスが植物の生育に与える影響は大きく、生産性の阻害要因を定量的に解析した1982年発表の論文では、環境ストレスが植物の生産性を阻害する最大の要因であることが示されている(図1)<sup>1)</sup>。従来型対策である肥料や農薬の使用は作物の生産性増大に大きく貢献してきたが、現代の日本農業においてはそれらの効果はほぼ飽和に達しており、環境ストレスを緩和して作物の生産性を向上する方法の開発が現在、作物の生産性向上に資する重要な突破口

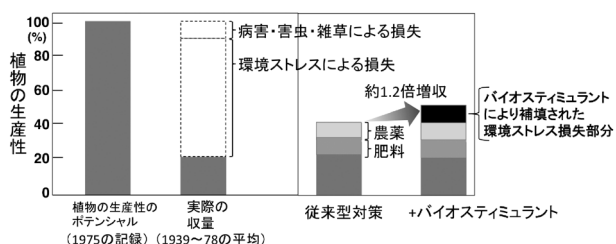


図1. バイオスティミュラントによる作物の生産性増大の概念。植物の潜在的な生産性の70%は環境ストレスにより阻害されている(グラフ左部分)<sup>1)</sup>。従来は肥料や農薬の使用により作物の増産が実現されてきた(グラフ右部分)。バイオスティミュラントは環境ストレスを緩和して作物の生産性を増加させる。この例では環境ストレスの影響を10%緩和することにより、収量が1.2倍になることを示す<sup>2)</sup>。

として期待されている所以である。

2. 植物の高温耐性を誘導する2-ヘキセナール

このような背景もあって環境ストレス研究は植物科学において重要な研究分野となっており、これまでに多くの知見が蓄積しているが、中でも環境ストレスに伴って葉緑体内で生成する活性酸素の正負両面での役割の理解深化が肝要で、これには日本の植物研究が大きく貢献している。我々は葉緑体の主要な膜脂質である多価不飽和脂肪酸が活性酸素により過酸化されて生成する低分子化合物の中に、環境ストレス応答遺伝子の発現を強力に誘導する一群の化合物が存在することを見出した(RSLVと名付けたC4~C9の直鎖 $\alpha,\beta$ -不飽和カルボニル化合物)<sup>3)</sup>。その中には植物が傷害を受けた際に放出されるみどりの香りの一成分である2-ヘキセナール(通称:青葉アルデヒド)が含まれており(図2A)、低濃度で揮発させた2-ヘキセナールを処理したシロイヌナズナでは、高温耐性誘導因子であるH<sub>2</sub>SFA2遺伝子が迅速かつ強力に誘導される(図2B)。さらに2-ヘキセナールにより同様に高温耐性を誘導したトマトでは48℃条件で被る高温障害が劇的に低下した(図3)<sup>4)</sup>。そこでこ

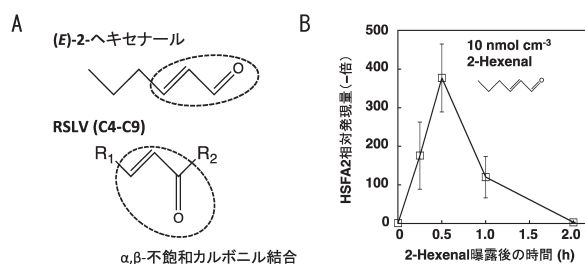


図2. (A) 2-ヘキセナールの化学構造とRSLVの一般式。 $\alpha,\beta$ -不飽和カルボニル結合が遺伝子発現活性に必須である。(B) 低濃度の2-ヘキセナール曝露処理によりシロイヌナズナの高温耐性誘導因子であるH<sub>2</sub>SFA2遺伝子が迅速かつ強力に誘導される。



図3. あらかじめ表記濃度の2-ヘキセナールを1時間曝露し高温耐性を誘導したトマトを48℃で90分高温処理した後の様子。0.001~0.1 ppmという低濃度で高温耐性向上能を示した。

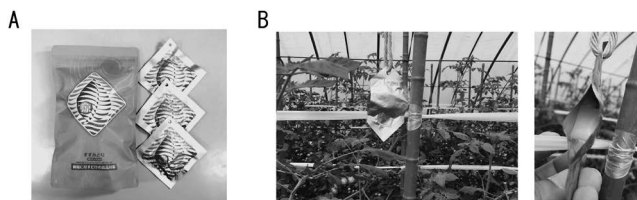


図4. (A)「すずみどり」のパッケージ。(B)ハウス栽培現場での実際の使用の様子。植物の成長点より少し高い位置に吊り下げた袋の中に揮発性錠材が入っており、2-ヘキセナルをハウス内に揮発させる。効果は一ヶ月持続する。

これらの科学的知見を農業現場で活かすべく、高温耐性誘導材の実用化を目指す応用研究を開始した。

### 3. 揮発性バイオスティミュラント「すずみどり」の実現

現在、日本の農業界において緊切の問題となっている環境ストレスの一つが夏期の高温ストレスである。そこで開発すべき高温耐性材として農家が求める製品像をヒアリングした結果、「処理方法が簡便であること」、「頻繁に取り替える必要の無いこと」、「消費者に受け容れられやすい化合物であること」が満たすべき条件であることが分かり、これらを念頭に2-ヘキセナルの実用化研究を進めた。製品の形態は2-ヘキセナルが揮発性であることを活かし、吊すだけで効果を示す揮発性錠材とした。しかし2-ヘキセナルはアルデヒドであるため使用中に容易に変質したり、一般的な昇華性基材を用いた初期の試作品が農業現場では長くても二週間ほどしか持たないなど、化学的安定性や保持時間の確保、さらには2-ヘキセナルにより剥離しない包装材の選定に難航した。しかし化学的安定性確保と長保持時間を両立する揮発性基材、また2-ヘキセナルに対する耐性を示す包装材を見出させたことにより、農業現場で一ヶ月効果が持続する揮発性錠材製品化技術の確立に至った。平成28年に試験販売をおこない、試用した農家から高い評価を得たことから、平成29年より2-ヘキセナル揮発性錠材を「すずみどり」という商品名で正式に販売を開始した(図4)。この揮発性バイオスティミュラント錠材は以下のような特徴を持つ。1) 調べた限り全ての植物種で、高温ストレス応答遺伝子(*HSPA2*)の発現誘導を介して、高温耐性を誘導する<sup>3)</sup>。2) 現代の日本では、農家、消費者ともに「食の安全・安心」指向が強い。2-ヘキセナルは植物自らが生合成する植物内在性化合物であり<sup>5)</sup>、従前より食品添加物や香料として用いられていることから、農家・消費者ともに農産物に対する使用への抵抗感が無い。3) 2-ヘキセナルをリノレン酸から生合成する酵素も単離しており<sup>5)</sup>、将来的には消費者指向に合致した天然素材由来成分を配合した錠材の開発を目指している。

### 4. 農業現場での実施例

「すずみどり」はまずハウス栽培トマトでその効果が発揮できることを目標に開発された。トマトは高温障害を受けやすい作物であり、特にその花芽が高温に弱い。高温障害を受けたトマトは花が咲いても果実形成に至らず落花してしまう(花落ち現象)ため、近年は、猛暑により収穫量が激減した農家も多数存在する。すずみどりはその花落ちを減少させることにより、結果的に果実の収量を増加させる(図5)。これまでの実績では平均して20%(平年比)ほどの増収を実現している。そして現在ではトマトに限らず、他のナス科作物、ウリ科作物、花卉、



図5. トマトの高温障害の典型は、「花落ち」とよばれる落花現象である。高温になるハウス内では、花が咲いてもその半分近くが高温障害により落花することがある。あらかじめすずみどりで処理しておいたミニトマトでは花落ちが劇的に改善され、その結果、果実の収量が增大する。

葉菜等、高温障害が問題となっている他の作物種のハウス栽培現場でも用いられており、押し並べて良い効果が得られているとの報告を受けている。

### おわりに

現在、温暖化や異常気象により大きなダメージを受けている農業界を、農学全体で支えなければならない状況にある。すずみどりは揮発性錠材という形態的特徴から、ハウスなどの閉鎖系施設栽培で適用可能な技術であるが、高温障害が問題となっている作物はイネやダイズなどの露地栽培の作物にも多い。今後も農芸化学という立場から、露地栽培のような開放系で使用可能なバイオスティミュラントの開発に取り組んでいきたい。

### (引用文献)

- 1) Boyer, T. S., Plant productivity and environment. *Science*, **218**, 443-338 (1982)
- 2) Yamauchi, Y., Chemical control of abiotic stress tolerance using bioactive compounds, in "Plant, Abiotic Stress and Responses to Climate Change" edited by Violeta Andielkovic, InTech (2018)
- 3) Yamauchi, Y., Kunishima, K., Mizutani, M., Sugimoto, Y., Reactive short-chain leaf volatiles act as powerful inducers of abiotic stress-related gene expression, *Sci. Rep.*, **5**, 8030 (2015)
- 4) Terada, N., Sanada, A., Gemma, H., Koshio, K., Effect of *trans*-2-hexenal vapor pretreatment on alleviation of heat shock in tomato seedlings (Micro tom), *J. ISSAAS*, **23**, 1-7 (2017)
- 5) Kunishima, M., Yamauchi, Y., Mizutani, M., Kuse, M., Takikawa, H., Sugimoto, Y., Identification of (*Z*)-3: (*E*)-2-hexenal isomerases essential to the production of the Leaf Aldehyde in plants. *J. Biol. Chem.*, **291**, 14023-14033 (2016)

謝辞 本賞にご推薦いただきました京都大学大学院農学研究科河田照雄教授、日本農芸化学会関西支部幹事、選考委員の先生方に深謝いたします。本賞の基盤となる基礎研究成果は、神戸大学大学院農学研究科植物機能化学研究室の諸先生と学生のみなさまのご協力の賜物であり感謝の念に堪えません。また錠材化技術につきましては、日本精化株式会社裾名康幸神戸工場長に数多くの有益なご助言をいただきましたこと、感謝申し上げます。最後に、基礎研究段階におきましては日本学術振興会(JSPS)、応用開発段階におきましては科学技術振興機構(JST)および兵庫県から研究費のご支援をいただきました。この場をお借りして厚く御礼を申し上げます。