

根域温度制御による園芸作物の生育・開花制御

日本大学
生物資源科学部

窪田 聡・村松 嘉幸

はじめに

筆者らは2012年から花苗の生育・開花に及ぼす根域温度の影響について注目し、様々な実験を行ってきた。当初は排水孔のない素焼鉢に植物を植え、その鉢を水を張ったプールベンチに置いてプール内の水温を加熱・冷却することにより根域温度を調節し、地上部の生育・開花に及ぼす影響について検討を行った。温室の最低気温を13°Cに加熱し根域は無加熱したものの、最低気温を8°Cまで下げて根域のみを18°Cに加熱したものを比較すると、明らかに根域を加熱したものの方が生育・開花が促進され、かつ消費エネルギー量が30%削減されることが明らかとなった。シクラメンは夏の高温に弱く、高温が続くと開花が遅延し年末出荷に間に合わなくなる。通常、低地で栽培している生産者は夏季に植物を高冷地に移動させる、いわゆる山上げ栽培を行っている。そこで、ミニシクラメンを用いて生育・開花に対する夏季の根域冷却の影響について検討した。その結果、気温が30°Cを超えるような高温期においても根域を20°C~23°Cに冷却すると無冷却に比べて著しく開花が促進され、年内の早い時期に出荷が十分に可能になることが明らかとなった。このように、根域温度は花苗の生育・開花に著しい影響を及ぼすことが示された。一方、これらの実験は素焼鉢を水を張ったプールベンチに入れて行うという実際の生産

現場と著しくかけ離れた方法で行われていたため、根域温度制御技術を生産現場に落とし込む装置の開発が必要であった。そこで、生産現場で一般的に使用されているビニル鉢に対して根域温度を制御できる新型根域環境制御装置(N.RECS)を産学連携で開発した。今回は開発されたN.RECSの性能と園芸作物に対する効果を紹介するとともに、今後の根域温度制御の可能性について述べてみたい。

1. 新型根域環境制御装置(N.RECS)の開発

N.RECSの概要を図-1に示す。発泡スチロール製の断熱パネルの上にア

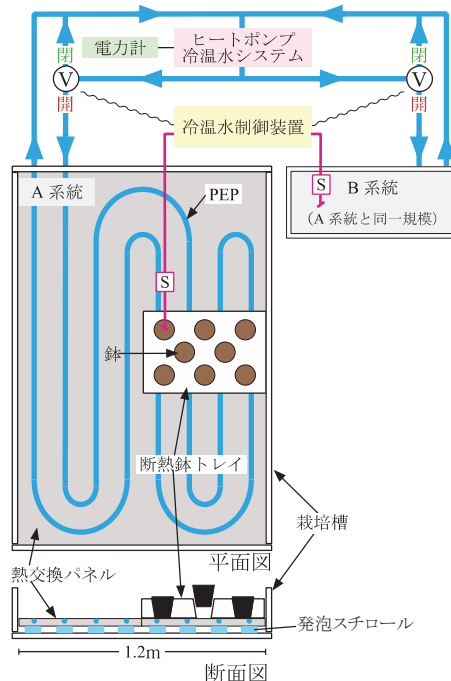


図-1 N.RECSの構造
V：電動三方バルブ、PEP：架橋ポリエチレンパイプ、S：土壌温度センサー

ルミ製熱交換パネルが敷かれ、熱交換パネルに冷温水を循環させるための架橋ポリエチレンパイプ(PEP)が熱交換パネル内に敷設されている。PEPには空気熱源式ヒートポンプ冷温水システムで製造された冷水(7~10°C)または温水(35~40°C)を循環させる。循環回路には電動三方バルブ(V)が設置されている。冷温水制御装置に接続された土壌温度センサー(S)で根域温度を測定し、任意に設定された根域温度になるようにVを開閉して、鉢内の温度を調節する仕組みになっている。鉢を熱交換パネルの上に直接おいただけでは加熱・冷却効果は限られるため、発泡スチロール製の断熱鉢トレイを熱交換パネルの上に敷き詰め(図-2)、断熱鉢トレイに鉢を入れて温度を調節する。このような方法で根域温度を制御すると(図-3)、冬季の無加熱温室(最低気温約5°C)であっても根域温度を約25°Cに維持するこ



図-2 N.RECSによる植物の栽培状況
熱交換パネルの上に断熱鉢トレイを敷き詰め、断熱鉢トレイ内にポットを入れて栽培する。

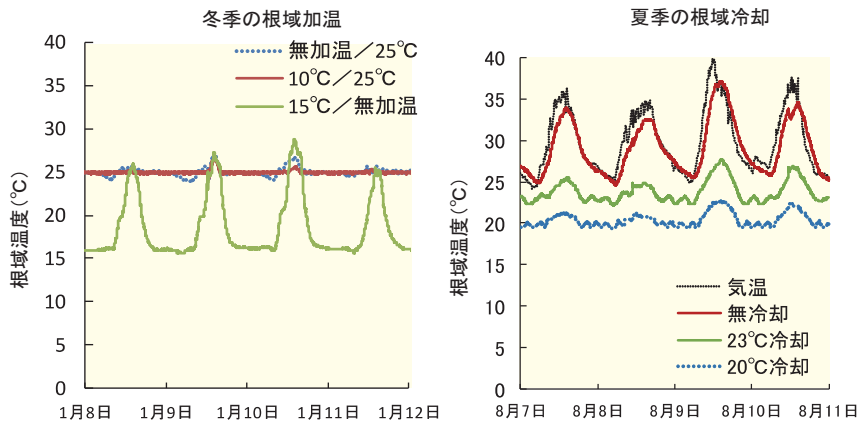


図-3 N.RECS における冬季の根域加温と夏季の根域冷却の制御性能

冬季の根域加温実験の凡例は温室の暖房温度/根域加温温度を示す。無加温/25°Cの最低気温は約5°Cであったが、根域温度はほぼ25°Cに保たれている。夏季の根域冷却では気温が35°Cを上回り、無冷却の根域温度も気温とほぼ同じ温度まで上昇しているが20°C冷却では最大でも23°Cを上回ることなく、気温に比べて約10°C冷却できている。

とができ、夏季には最高気温が35°Cになっても根域温度を23°C以下に抑えることができる。

2. 花き生産に対する N.RECS の効果

N.RECS を使用して冬季の矮性ダリアの根域加温栽培を行ったところ (図

-4)、温室の暖房温度を普通栽培よりも3°C程度下げ根域を24°Cに加温すると、明らかに生育・開花が促進されるとともに、全体の消費エネルギーコストが30%削減された。また、耐暑性が低いフクシアを用いて夏季に根域冷却を行ったところ (図-5)、根域無冷

普通栽培 (根域無加温, 最低気温 15 ~ 16°C)



N.RECS (根域 24°C加温, 最低気温 12°C)



図-4 冬季の矮性ダリアの生育・開花に及ぼす根域加温の影響

N.RECS で根域加温を行った植物では、普通栽培に比べて分枝数、葉数、着蕾数が増加している。消費エネルギーコストは N.RECS で 30%削減された。

根域無冷却



根域 20°C冷却



図-5 高温期のフクシアの生育に及ぼす根域冷却の影響

実験期間中の最高気温は両区とも同一であり 30 ~ 35°Cであった。根域無冷却では根がほとんど張っておらず地上部が枯死しているが、N.RECS によって根域を 20°Cに冷却すると根が旺盛に生育し、地上部の成長も促進されている。

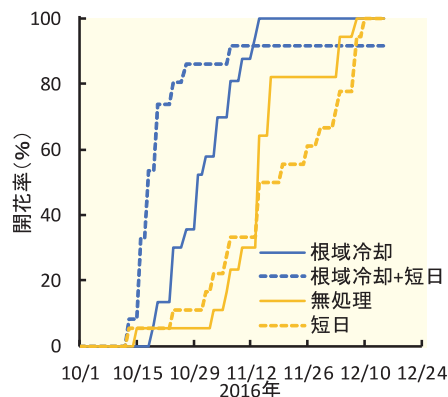


図-6 一季成り性イチゴの開花に及ぼす根域冷却と短日処理の影響

品種‘女峰’9cmポット苗を8月4日にN.RECSが設置された土耕ベンチに定植した。根域冷却(約20℃)は8月4日～10月7日まで、短日処理は8月4日～9月1日まで実施した。

却では約半数の株が枯死したが、根域を20℃に冷却すると全ての株が生存し健全に生育した。この他にもロードンセマムを用いた根域冷却試験を行ったところ、夏季の根域冷却は植物の健全性を維持するのに極めて有効であることが示されている。これらの根域冷却実験は最高気温が35℃に達するような猛暑の期間に行われた。根域のみを冷却することで植物の健全性が保たれたことは、植物の耐暑性は地上部だけでなく根の耐暑性が重要な要因として関わっていると推察される。一般に地床で植物を栽培する畑栽培では、地表から地中に向かって土壌温度は気温の変化を受けにくくなり、年間を通じて安定して推移する(千葉 1970)。一方、鉢栽培における根域温度は、気温と同じか日射の影響を受けて気温よりも高くなる場合が多くなるとともに、日周変動も大きい。したがって、鉢で栽培する植物ほど根域温度の影響を受けやすいと考えられ、N.RECSによる根域温度制御は有効だろう。

現在まで花き植物においては、冬季の根域加温による生育・開花促進と省エネルギー化が可能な品目として、鉢栽培では矮性ガーベラ、矮性ダリア、球根ペゴニア、ゼラニウム、プリム

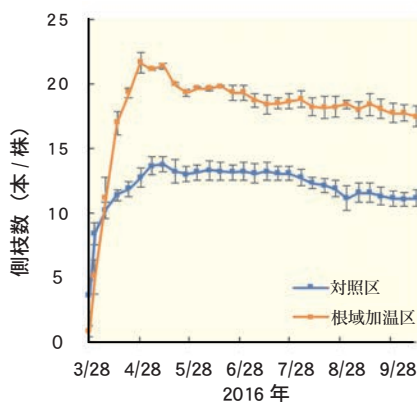


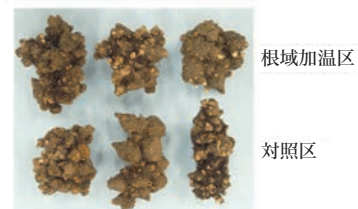
図-7 薬用植物ソウジュツの地上部生育と根茎発達に及ぼす根域加温の影響
ソウジュツの側枝数は対照区に比べて根域加温によって明らかに増加した。根茎重も根域加温区では対照区の約1.2倍に増加した。

ラ・オブコニカ(村松ら 2018)、ベッド栽培では切り花ガーベラ(村松ら 2019a)について確認され、夏季の根域冷却ではフクシア、ロードンセマムの枯死防止と生育促進、ガーデンシクラメン、パンジー、アネモネでは生育促進、花数増加と開花期前進が認められている。

3. 野菜・薬用植物生産に対するN.RECSの効果

N.RECSによる根域温度制御は花き植物だけでなく、野菜や薬用植物の栽培にも効果を発揮する。11月頃から出荷が始まる一季成り性イチゴは様々な品種が開発されているが、基本的には25℃以下の冷涼な気温と短日により花芽が分化する。そのため、11月にイチゴを出荷するためには、遅くとも9月には花芽を誘導する必要がある。夏季の花芽誘導は保冷库にイチゴの苗を1ヶ月程度毎日出し入れすることにより、低温と短日処理が同時に行える夜冷栽培が行われている。しかし、保冷库に大量の苗を出し入れする労力がかかる欠点がある。この方法で花芽誘導したイチゴの苗を本圃に定植するが、高温条件が継続すると頂花房が開花して腋芽が花芽分化せず栄養成長を継続してしまうことがあり、その

処理区	根茎重 (g/株)
根域加温	154.7
対照	130.7



防止のためにイチゴの苗のクラウン(短縮茎部)に冷水を循環させたチューブを接触させてクラウンの温度上昇を抑え、花芽分化の安定化を促す株元冷却技術も開発されている。そこで、一季成り性イチゴの花芽誘導にN.RECSによる根域冷却が有効かどうかを検討した(図-6)。その結果、品種‘女峰’の苗をN.RECSによって根域温度制御が可能な土耕ベンチに定植し、8月4日から根域を20℃に冷却し短日処理を併用したところ、開花率が80%に達するまでの所要日数は、無処理あるいは短日処理のみに比べて1ヶ月以上短縮し10月中～下旬に開花した(水野ら 2018)。また、イチゴのポット苗でもN.RECSによる根域冷却と短日処理を併用すると著しい開花促進効果が認められた。したがって、N.RECSは労力がかかる従来の夜冷栽培を代替することができるほか、冬季の加温も行えるため温室全体を暖房する従来法よりもランニングコストが安くイチゴの樹勢維持にも貢献するだろう。

薬用植物のソウジュツ(ホソバオケラ)は根茎を生薬として使用する。そこで、冬季の根域加温がソウジュツの生育と根茎肥大に及ぼす影響について検討した(図-7)。温室の最低気温を約16℃で管理した対照区と、最低気温を10℃に下げ根域温度を24℃に加

表-1 トマト苗の初期生育に対する気温と根域温度の影響

実験	気温/根域温度	葉面積	葉数	葉1枚当たりの葉面積	草丈	総根長
根域温度調節	22℃/27℃	122	100	120	100	149
	22℃/22℃	100	100	100	100	100
	22℃/17℃	69	95	72	92	60
気温調節	27℃/22℃	112	111	101	142	109
	22℃/22℃	100	100	100	100	100
	17℃/22℃	63	79	80	78	74

根域温度調節は気温を22℃に固定して、根域温度を17～27℃の範囲で変更し、気温調節は根域温度を22℃に固定して、気温を17～27℃の範囲で変更した。測定データは22℃/22℃の測定値を100とした時の相対値として示した。なお、根域温度調節および気温調節における22℃/22℃の生育にはほとんど差がなかった。根域温度調節では地上部の生育に対して葉面積に著しい影響が出ている。一方、気温調節では葉面積、葉数、草丈にも著しい影響が見られる。

温した根域加温区の生育を比較すると、根茎から発生したシュートの株あたりの側枝数は明らかに根域加温区で増加し、また実験終了時に収穫した根茎の新鮮重も対照区に比べて1.2倍に増加した。一般的に植物の二次代謝成分の濃度は、生育が抑制されて新鮮重が減少すると高くなり、逆に新鮮重が増加すると低下する傾向が見られる。しかしながら、本実験では新鮮重が増加した根域加温区においても、根茎のメタノール抽出エキスの濃度に差はなかった。したがって、ソウジュツの根域加温は生薬成分量の増加に有効であることが示された。なお、消費エネルギーコストは対照区よりも約30%削減された。野菜ではその他にもシソ(大葉)の冬季の根域加温栽培では慣行法と収穫量は変わらないが消費エネルギーコストは30%削減されるほか、根域冷却ではゴマの葉に含まれる機能性成分が増加、高温期のトマトの苗生産では生育促進、トマトの果実生産では生育促進、着花数増加、尻ぐされ防止効果が認められている。以上のことから、N.RECSは野菜や薬用植物等を含めた幅広い植物の生育制御にも効果的であると判断できる。

4. 根域温度制御による植物の新しい生育制御方法

現在まで、鉢栽培、ベッド栽培、養液栽培などの各種栽培方法に対応し、根域を加温・冷却できるシステムはN.RECS以外に存在しない。現在まで

の研究はN.RECSの根域加温・冷却に対する各種園芸作物の適応性試験を中心に行い、すでに述べたような一定程度の成果を得た。一方、根域温度が植物の地上部のどの部分に特異的に影響するのには十分に明らかになっていなかった。そこで、人工気象室内にN.RECSを導入して気温と根域温度の相互関係についてトマト苗を材料に検討した(表-1)。その結果、根域温度は葉面積と総根長には強い影響を及ぼすが葉数と草丈にはほとんど影響しないこと、気温は葉面積、葉数、草丈、総根長に影響することが明らかとなった。このことから、根域温度を植物の生育に応じて可変制御し葉面積の拡大速度を制御できる可能性が考えられた。

そこで、実験材料として茎があまり伸長せずロゼット状に葉が広がり、植物の葉面積を画像解析によって測定しやすいパチュニアを用いて、根域温度の可変制御が葉面積の拡大速度に及ぼす影響について検討した。具体的には、N.RECSを設置した冬季の無加温温室にデジタルカメラを設置し、植物の頭上から静止画を毎日撮影した。静止画から画像解析ソフトウェア(Image J)で葉の部分を抽出し、そのピクセル数から実際の葉面積を算出した。最終目標の葉面積(100cm²)とその目標到達期間(30日と45日)をあらかじめ設定し、両者から指数関数による成長曲線モデルを作成した。その成長曲線モデルと計測した葉面積を毎日照らし合わせ、成長曲線モデルに葉面積

ができるだけ適合するように根域温度を調節した。その結果、目標到達期間が30日と45日に設定した区の実際の到達期間は、それぞれ33日と47日となり目標に対する遅延は2～3日であった(村松ら2019b)。このことは、N.RECSによる根域温度制御が植物成長(葉の拡大成長)を比較的精度良く制御できることを示し、この技術により品目によっては出荷時期を調節することが可能であると考えられる。N.RECSは温室のベンチごとに設置できることから、それぞれのベンチが独立して根域温度を制御すれば、今まで困難であった同一の温室で同一時期に栽培を開始した植物の出荷時期をずらすことが可能になり、労働力の分散化に大きく貢献するだろう。

近年、生産者においても野菜苗等の初期成長に人工気象室が利用されるようになった。人工気象室においても、基本的には温室と同様に気温と根域温度に大きな違いはない。しかし、人工気象室とN.RECSを組み合わせ、気温と根域温度を独立して精密に制御すれば、今まで不可能であった新しい植物形態形成の制御方法を編みだすことも可能視できる。

5. 根域温度による葉面積拡大のメカニズム

葉の拡大には細胞の吸水成長が重要である。細胞の吸水は細胞の水ポテンシャルと土壌の水ポテンシャル間の勾配によって行われる。両者の水ポテン

シャルは細胞内で低く土壌で高いため、水は土壌から細胞へ流れる。土壌水分が少なくなったり、土壌に塩類が集積したりすると土壌の水ポテンシャルが大きく低下し、細胞に吸水されにくくなる。植物の個体としてみたときの根の吸水量は、根長（表面積）と単位根長（単位表面積）当たりの吸水能力の積によって規定されると考えられる。根は一般に低温よりも高温条件でよく伸長する。

細胞に水が入るためには、細胞膜や液胞膜を通過しなければならない。これらの生体膜にはアクアポリン（水チャネル）と呼ばれる水透過性タンパク質が膜を貫通するように多数局在している（Maurelら 2008）。アクアポリンには1つの水分子よりも僅かに大きな孔が開いており、この孔を水分子が通過することによって生体膜の内側と外側に水が移動する。アクアポリンはチャネルとしての機能しか持たず水輸送の方向性は制御しないが、細胞内のpHやカルシウムイオン濃度によって孔の開閉が制御されるため水の通過速度を制御する。したがって、生体膜に存在するアクアポリンの量が多く、アクアポリンの孔が開いている場合により多くの水が生体膜を通過できる。

単位根長あるいは単位面積あたりの吸水能力は、主に根の生体膜におけるアクアポリンの分布とその機能を反映していると考えられる。イネでは根域温度が低下すると根の水透過性が一時的に低下するが、その後水透過性が回復するとともに一部のアクアポリン遺

伝子の発現量が増加する（Ahamedら 2012）。一方、筆者が水耕栽培トマトを使って異なる根域温度で4日間栽培された植物の根のmRNAの違いを次世代シーケンサーで解析したところ、根域温度が22°Cから17°Cに低下すると数種類のアクアポリン遺伝子の発現量が半減した（未発表）。以上のことから、根域温度は根の発育とアクアポリンの発現を通して、植物の吸水量に非常に大きな影響を与える。そして、地上部の生育、特に吸水成長の結果として起こる葉面積の拡大に関係していることが示唆される。

以上のように、根域温度は植物の成長に強い影響を及ぼすことが様々な園芸植物において実証された。温室の環境制御では地上部の気温、湿度、飽差、CO₂濃度、光強度、日長などの環境パラメータの計測と制御が可能となり、先端的な施設園芸ではこれらの制御が日常的に行われている。一方、地下部環境に目を向けると養液栽培では土壌水分、EC、pHの計測と制御が行われているものの、根域温度の制御はほとんど行われておらず、その他の栽培方法では地下部環境の計測と制御は全く行われていないのが実情である。したがって、根域温度は農業生産において制御すべき環境制御パラメータであるといえ、根域温度制御を農業生産の標準技術として取り入れることにより、より柔軟により省エネルギーで植物成長の調節が可能になるだろう。また、耐暑性が低いフクシアやローダンセマムの根域温度を冷却するだけで生

存性が大幅に向上したように、植物全体の耐暑性には根の耐暑性が大きく関わっていると考えられることから、根の耐暑性を指標とした植物育種にも今後注目する必要がある。

なお、本報は農林水産省委託プロジェクト研究「国産花きの国際競争力強化のための技術開発」および日本大学学長特別研究第2期「日本大学発 スマートアグリカルチャーの創出と産業化を目指した技術開発」によって行われた成果を中心にまとめたものである。

引用文献

- Ahamed, A. *et al.* 2012. Cold stress-induced acclimation in rice is mediated by root-specific aquaporins. *Plant Cell Physiol.* 53, 1445-1456.
- 千葉, 1970. VIII. 土壌の物理. p.115-128, 農林省振興局研究部監修, 農業気象ハンドブック, 養賢堂, 東京.
- Maurel, C. *et al.* 2008. Plant aquaporins: Membrane channels with multiple integrated functions. *Ann. Rev. Plant Biol.* 59, 595-624.
- 水野真二ら 2018. 根域環境制御装置(N.RECS)を用いた根域冷却と短日処理による一季成り性イチゴの超促成栽培. *園学研* 17(別1), 327.
- 村松嘉幸ら 2018. 新型根域環境制御装置(N.RECS)による冬季の根域加温が花卉植物の生育・開花に及ぼす影響. *園学研* 17(別2), 290.
- 村松嘉幸ら 2019a. 新型根域環境制御装置(N.RECS)による冬季の根域加温が切り花ガーベラの収量と省エネルギー性に及ぼす影響. *園学研* 18(別1), 222.
- 村松嘉幸ら 2019b. 画像解析と成長曲線モデルに基づいた根域温度調節による花苗の成長制御. *園学研* 18(別2), 264.