冬季の根域加温はインパチェンスの生育促進に効果的である

村松嘉幸・窪田 聡*・腰岡政二

日本大学生物資源科学部 252-0880 神奈川県藤沢市亀井野

Root-zone Heating during Winter Season is Effective to Promote Growth of *Impatiens walleriana* Hook. f.

Yoshiyuki Muramatsu, Satoshi Kubota* and Masaji Koshioka

Nihon University, Collage of Bioresource Sciences, Kameino, Fujisawa, Kanagawa 252-0880

Abstract

Impatiens (*Impatiens walleriana* Hook. f.), whose cultivation requires heating in a greenhouse during the winter season, was used in this experiment to investigate the effects of root-zone heating on growth, flowering, and energy consumption. Four combinations of minimum air temperatures and root-zone temperatures: 8°C/non-heating, 13°C/non-heating, 8°C/13°C, and 8°C/18°C, were set, respectively, and the *Impatiens* plants were cultivated from February 1 to April 22, 2014 in a greenhouse. The number of leaves, leaf area, and dry weight of the top increased with rising average root-zone temperatures, and there was a close relationship between growth and the average root-zone temperature. The flowering season was about 10 days earlier at 8°C/13°C and 8°C/18°C than that at 13°C/non-heating. Energy consumption at 8°C/18°C, when growth and flowering were the most accelerated, was reduced by about 32% compared with that at 13°C/non-heating.

Key Words : energy-saving, local heating, porous pot, root-zone temperature

キーワード : 根域温度, 局所加温, 省エネルギー, 多孔質鉢

緒 言

非耐寒性1年草を春に早期出荷するためには、冬季から播種・育苗が必要であり、温室などでの加温栽培が必須である。農林水産省（2008）は施設園芸省エネルギー型栽培技術を開発するうえで、果菜類・花き類などにおいて30%以上の省エネルギー効果のある局所加温技術の開発を求めている。森山ら（2011）は通常12°Cで管理するナスの促成栽培において、株元加温によりハウス内の温度を10°Cに下げても慣行栽培と同等の収量が確保され、灯油消費量を31%削減できることを明らかにした。神奈川県下において、バラは最低気温を18°Cに保ち栽培するが、15°Cに下げても株元加温を併用すると高い生産性が確保でき、慣行栽培と比べて温室への投入暖房熱量は約20%削減され、採花本数当たりのA重油使用量も約40%削減できる（神奈川県農業技術センター, 2012）。鉢物栽培では数種の観葉植物において温室に設置したチャンパー内を電熱線で加温することにより、温室全体を20°Cで管理した場合と同等の生育を示し、暖房コストを約50%削減できる（新井ら, 2009）。このように、農林水産省の開発目標をクリアする省エネルギー型の局所加温技術の開発が近

年進んでいる。

窪田ら（2011）は、排水孔のない多孔質鉢にパンジーを植え込み、これを底面給水装置の給水槽において、生育を調査したところ、頭上灌水やマット給水よりも生育が促進され、多孔質鉢は根域温度などの環境条件を調節する根域環境制御システム（RECS）の水供給装置として利用可能であることを明らかにした。さらに、RECSを利用しバーベナとゼラニウムの生育・開花に及ぼす根域加温の影響について検討したところ、根域加温によって地上部の成長と開花が促進された（窪田ら, 2013）。このため、気温を標準的な栽培温度よりも低く管理し、RECSを用いて根域を加温することにより、全体の投入エネルギー量を低減できる可能性が示唆された。しかし、RECSにおける投入エネルギー量および根域温度と生育・開花との関係については明らかになっていない。

インパチェンスは春から秋にかけての花壇苗としての需要が大きい。春の早期出荷のためには冬季に播種し育苗する必要があるが、インパチェンスの生育適温は20～25°Cであり、15°C以下で花付きの減少や生育が劣り、5°C以下では生育が停止する（西村, 1994）。従って、冬季栽培には15°C以上に加温することが望ましいが、生産者によっては13°C程度に最低気温を抑え、経費の節減を図っている。

そこで本研究では、RECSの実用化を目指した開発の一

2016年10月25日 受付. 2016年12月18日 受理.

* Corresponding author. E-mail: kubota.satoshi@nihon-u.ac.jp

環として、小規模なプロトタイプによる根域加温が、どの程度の省エネルギー性を持つかを評価するために、冬季のインパチエンス栽培において、投入エネルギー量と生育・開花との関係を調査し、根域温度と地上部の生育との関連性について解析した。

材料および方法

供試材料はインパチエンス (*Impatiens walleriana* Hook. f.) ‘インプレザ レッド’を用いた。本葉が3~6枚のセル成型苗を2014年1月31日に培養土(赤玉:黒土=1:1)を充填した排水孔のない4号素焼鉢(多孔質鉢)に定植した。肥料はマグアンプK(N:P₂O₅:K₂O:MgO=6:40:6:15, (株)ハイポネックスジャパン)を基肥として1鉢当たり3gを施用した。追肥は施用しなかった。実験区は最低気温を8°Cとし、根域温度を無加温(8°C/無加温区), 13°C(8°C/13°C区)および18°C(8°C/18°C区)と最低気温を13°Cとし、根域温度を無加温(13°C/無加温区)とした計4区とした。各区10株の5反復とした。実験は神奈川県藤沢市の日本大学生物資源科学部農場のガラス温室で行った。

RECSは村松ら(2015)と同一のものを使用した。RECS用のプールは白色発泡スチロール製のEK水槽I型(幅324cm, 高さ16cm, 奥行き129cm, カネコ種苗(株))を用い、これを高さ約70cmの栽培ベンチ上に置き、プールの内側を防水シートで被覆した。これに4cm間隔で直径12.5cmの穴を横5列、縦7列開けた断熱材(幅90cm, 高さ2.5cm, 奥行き120cm, スタイロフォームIB, ダウ化工(株))を3枚乗せ、その穴に植物を植えた4号の多孔質鉢をはめ込んだ。プール内の水は排水口を通して栽培ベンチの下に設置した給水槽(幅50cm, 高さ35cm, 奥行き40cm)に集め、この中に500Wの水中ヒーター(パワーセーフプロ500, (株)マルカン)を設置した。給水槽から給水ポンプ(コンパクトポンプ300, エーハイムジャパン(株))で水をクーラー(LX-300ESB, (株)イワキ)に通した後、プールに汲み上げ循環させた。プールの水深は常に4cmになるように調節した。なお、本実験ではクーラーは稼働させなかった。

この栽培ベンチを直径16mmの鉄パイプで作製した保温枠(幅350cm, 高さ240cm, 奥行き160cm)で囲み、被覆材(サニーコート, 宇部日東化成(株))で二重被覆し、4月5日以降は気温の上昇に伴って被覆材を1枚にした。

気温調節には、各区1台ずつ1000Wの電気温風機(SF-1008A, 総和工業(株))を用いた。電気温風機は常時送風するようにし、保温枠内の空気が循環するようにした。設定温度を下回った場合にヒーター部の電源が入る設定とした。最高気温の制御は特に行わなかった。8°C/13°C区および8°C/18°C区には、鉢内に温度コントローラー(TC-101, (株)イワキ)のセンサーを土壌面から深さ約3cmの位置に埋設し、根域温度が設定温度になるよう

に水中ヒーターを制御した。8°C/無加温区および13°C/無加温区の根域温度は調節せず、他区と同様に給水ポンプで水を循環させた。

根域温度と気温は温度ロガー(RTR-52A, (株)ティアンドディ)を用い10分間隔で自動計測した。根域温度測定用センサーは温度コントローラーのセンサーと同じ位置に設置し、気温測定用のセンサーは電気温風機のセンサーと束ね、鉢上面約10cmの位置に設置した。

日平均気温および日平均根域温度は10分間隔で記録された温度データを平均して求めた。消費電力量はワットチェッカー(TAP-TST5, サンワサプライ(株))で常時測定した。

実験は2月1日から4月22日まで行った。開花株率は小花が1輪以上開花している株数を供試株数で除して求めた。4月22日から23日にかけて全株を葉、茎および花に分けて採取した。葉面積は葉面積計(LI-3100, LI-COR, Inc)で計測した。各部位を80°Cで通風乾燥後に乾物重を測定した。得られた結果は、Tukeyの多重検定により有意差検定を行った。

結 果

実験期間中の気温と根域温度の代表例として、厳冬期(2014年2月5日~9日)の日変化を第1図に示した。各区の最低気温は、ほぼ設定どおりに推移した。根域温度は8°C/無加温区では最低温度が約8°C、最高温度は約13°Cで推移した。13°C/無加温区では8°C/無加温区よりも約2°C高く推移した。根域を加温した8°C/13°C区と8°C/18°C区の最低温度は概ね設定どおりに推移し、最高温度は8°C/13°C区では約17°C、8°C/18°C区では20°Cを上回った。なお、2月8日は降雪のため、日中の温度上昇は見られなかった。

第2図に実験期間中の日平均気温と日平均根域温度の推移を示した。日平均気温は最低気温8°C設定の3区において、2月中旬の約12°Cから3月下旬の約18°Cまで徐々に上昇し、3月下旬以降は13°C/無加温区とほとんど差がなくなった。13°C/無加温区の日平均気温は、実験期間中15~18°Cの間を推移した。日平均根域温度は、8°C/18°C区において実験期間中約19°Cでほぼ一定に推移した。8°C/13°C区では2月中旬から3月上旬にかけて14~15°C前後であったが3月下旬には約17°Cまで上昇した。8°C/無加温区では2月中旬は約11°Cであったが、その後上昇し3月下旬には約17°Cとなった。また、13°C/無加温区では3月中旬までは8°C/無加温区よりも1~2°C高く推移したが、3月下旬以降には両者にほとんど差がなくなった。

第1表に実験期間中の電気温風機と根域加温用ヒーターの消費電力量を示した。電気温風機の消費電力量は13°C/無加温区で最も多くなり、最低気温を8°Cに設定した3区では根域温度の設定温度が高くなるほど減少した。根域

第1図 気温と根域温度の日変化 (2014年2月5日～9日)
各区の気温と根域温度は10分間隔で自動的に記録した

第2図 実験期間中の日平均気温と日平均根域温度の推移 (5日ごとの平均)
10分間隔で記録した温度データを平均して日平均気温と日平均根域温度を算出した

第1表 実験期間中の電気温風機と根域加温用ヒーターの消費電力量

温度区 (最低気温/ 根域温度)	電気温風機 (kwh/区)	根域加温用 ヒーター (kwh/区)	合計 (kwh/区)	削減率 ^z (%)
13°C/無加温	925	0	925	—
8°C/18°C	103	523	626	32
8°C/13°C	148	213	361	61
8°C/無加温	228	0	228	75

^z 13°C/無加温の消費電力量に対する削減率

加温用ヒーターの消費電力量は8°C/18°C区では523kwh/区、8°C/13°C区では213kwh/区であった。合計の消費電力量は13°C/無加温区で最も多く、最低気温8°C設定では根域温度が高いほど多くなった。13°C/無加温区に対する消費電力量の削減率は、8°C/18°C区で32%、8°C/13°C区で61%、8°C/無加温区で75%であった。

第2表にインパチェンスの生育と開花に及ぼす根域加温

第2表 インパチェンスの生育と開花に及ぼす根域加温の影響

温度区 (最低気温/ 根域温度)	葉数 (枚/株)	葉面積 (cm ² /株)	分枝数 (本/株)	蕾数 (個/株)	花数 (輪/株)
13°C/無加温	106.7b ^z	127.9b	11.4b	23.5b	7.0b
8°C/18°C	186.5a	346.1a	18.3a	43.0a	14.7a
8°C/13°C	103.7b	150.6b	9.8b	25.4b	7.7b
8°C/無加温	91.2b	106.9c	8.1b	22.1b	5.3c

^z Tukeyの多重検定により異なる符号間に5%の危険率で有意差あり (n=5)

の影響について示した。葉数は8°C/18°C区で186.5枚と最も多くなり、13°C/無加温区と8°C/13°C区の1.7～1.8倍、8°C/無加温区の2.0倍に達した。葉面積は8°C/18°C区で346.1cm²と最も大きく、13°C/無加温区と8°C/13°C区の2.3～2.7倍、8°C/無加温区の約3.2倍となった。分枝数は8°C/18°C区で18.3本と最も多くなった。蕾数は8°C/18°C区で最も多く43.0個となり、そのほか

第3表 インパチェンスの地上部の乾物重に及ぼす根域加温の影響

温度区 (最低気温/ 根域温度)	葉 (g/株)	茎 (g/株)	花と蕾 (g/株)	地上部の合計 (g/株)
13℃/無加温	0.31bc ²	0.19bc	0.21bc	0.71bc
8℃/18℃	0.70a	0.58a	0.50a	1.77a
8℃/13℃	0.33b	0.23b	0.25b	0.81b
8℃/無加温	0.24c	0.15c	0.16c	0.55c

² Tukeyの多重検定により異なる符号間に5%の危険率で有意差あり (n=5)

の区では22.1～25.4個であった。花数は8℃/18℃区で最も多く14.7輪、13℃/無加温区と8℃/13℃区は7.0～7.7輪で8℃/18℃区の約半分であった。8℃/無加温区は5.3輪と最も少なかった。

第3表にインパチェンスの地上部の乾物重に及ぼす根域加温の影響について示した。葉、茎および花と蕾の乾物重は8℃/18℃区で最も多く、8℃/13℃区、13℃/無加温区、8℃/無加温区の順で少なくなった。地上部の合計の乾物重は8℃/18℃区で1.77gと最も多く、気温と根域温度が最も低い8℃/無加温区では0.55gと最も少なかった。

第3図にインパチェンスの開花株率の推移に及ぼす根域加温の影響について示した。3月11日に8℃/18℃区、8℃/13℃区、13℃/無加温区で開花が認められた。8℃/18℃区では開花が急速に進み3月中旬には60%を超え、4月1日には100%に達した。8℃/13℃区の開花株率は3月中旬から急速に増加し、3月下旬には約90%まで達した。開花株率が80%に達した時期は根域加温を行った8℃/18℃区と8℃/13℃区では3月中旬、根域を加温しなかった8℃/無加温区と13℃/無加温区では3月末となり、根域加温によって開花が約10日間早くなった。

第4図に実験終了時のインパチェンスの生育と開花状況

第3図 インパチェンスの開花株率の推移に及ぼす根域加温の影響

について示した。8℃/無加温区、8℃/13℃区および13℃/無加温区の株は小さかったが、8℃/18℃区の草姿は製品としてのボリューム感があり花数も多かった。

第5図に実験期間中の各区の平均根域温度および平均気温と葉面積および地上部の乾物重との間の相互関係について示した。葉面積と地上部の乾物重は、平均根域温度の上昇に伴い直線的に増加し、両者の相関係数はそれぞれ $r=0.999$ および $r=0.998$ と1%の危険率で有意性が認められた。一方、各区の平均気温と葉面積および地上部の乾物重との間には相関関係は見られなかった。

考 察

インパチェンスは花壇苗としての需要が多く、春の早期出荷のためには冬季に播種し育苗する必要がある。インパチェンスの生育適温は20～25℃と高いため、冬季の生産では暖房コストがかかる。そこで、本研究ではいくつかの品目で効果を示されているRECSによる根域加温（窪田ら, 2013）が冬季のインパチェンスの生育・開花に与える

第4図 インパチェンスの生育と開花に及ぼす根域加温の影響
2014年4月22日撮影

第5図 実験期間中の平均根域温度および平均気温と葉面積および地上部の乾物重との相互関係
**は1%の危険率で有意性有りを示す

影響を検討するとともに、その省エネルギー性について評価した。

RECSのプロトタイプを用いた本実験において、インパチェンスの生育と開花は最低気温を13°C設定とし根域を加温しなかった13°C/無加温区よりも、最低気温を8°C設定とし根域を18°Cに加温した8°C/18°C区で著しく促進された(第2, 3表, 第3, 4図)。電気温風機の消費電力量は、最低気温を8°C設定とした区では根域温度が高くなるほど減少した(第1表)。これは、根域加温によって鉢土表面またはRECSの装置の一部から大気への熱供給があったためと考えられる。電気温風機と根域加温用ヒーターの合計消費電力量は、生育と開花が最も促進された8°C/18°C区において、13°C/無加温区よりも32%減少した(第1表)。このことから、本実験で用いたRECSのプロトタイプは、省エネルギー効果の高いシステムであると考えられる。

葉面積および地上部の乾物重と各区の平均根域温度との間には極めて高い相関関係が認められたが(第5図)、平均気温との間には相関関係はほとんどなかった。このことは、本実験の温度範囲内においてはインパチェンスの生育に対して気温よりも根域温度が強い影響を与えていることを示唆している。現在まで、植物の生育・開花に最適な気温については、極めて多くの検討がなされてきた。このうち、鉢物・苗物栽培では、気温を変化させると根域温度もほぼそれに追従して変化する(窪田ら, 2011)ため、地上

部と地下部の温度の影響については同じ温度に調節した場合の生育・開花反応を観察していることになる。一方、本実験では、気温は8°Cと低くても、根域を13°Cや18°Cに加温すると生育が促進されたことから、今後、気温と根域温度を切り分けて多くの植物の生育・開花を評価することにより、さらに効率的な温度管理方法を開発するための基礎資料を得ることができると考えられる。

根域温度を18°Cに加温すると、葉数の増加に伴い葉面積が著しく拡大し(第2表)、乾物重も増加した(第3表)。開花は根域加温することで早い段階から始まり、開花株率が80%以上に達した時期は根域無加温の2区よりも1週間以上早く、蕾数と花数が有意に多かった。窪田ら(2013)は、ゼラニウムとバーベナの生育に及ぼす根域温度の影響を検討したところ、根域温度の上昇に伴い葉数の増加、葉面積の拡大、開花の促進を認めた。また、ミニシクラメンでは夏季に根域を20°Cに冷却すると葉面積が小さくなり、開花が促進されることが明らかとなっている(村松ら, 2015)。異なる植物を用いたこれらの実験から、根域温度の上昇に伴い葉面積が増加するという共通の現象が認められる。

Nagasugaら(2011)がイネの乾物生産と水吸収に及ぼす根域温度の影響について検討した結果では、純同化率と個葉の光合成速度には根域温度の影響は全くなかったが、根域温度を14°Cに低下させると葉面積が減少するため乾物生産も減少することを明らかにしている。そして、葉面積の減少は低根域温度による根の生育抑制を通じた地上部への水供給の制限によってもたらされることを明らかにした。Boyer(1970)は、葉の水ポテンシャルの変化は葉の相対成長速度と光合成速度の両方に影響するが、葉の相対成長速度は光合成速度よりも水ポテンシャルの変化に対して極めて鋭敏に反応し、葉の水ポテンシャルがわずかに低下しても大きく低下することをダイズ、ヒマワリ、トウモロコシを例として示している。これらのことから、本実験のインパチェンスにおいても根域温度が根の成長に影響を与え、根からの水吸収によって葉面積がコントロールされていた可能性がある。今後、根域温度が根の成長と植物の水ポテンシャルに与える影響について検討する必要がある。

以上のことから、本実験で使用した小規模なRECSにおいて、生育適温よりも低い最低気温8°Cとしても、根域温度を18°Cに保つことでインパチェンスの生育と開花が促進され、最低気温を約13°Cに保つ慣行に準じた栽培よりも消費電力量を抑えることが可能であった。しかし、現在、花壇苗の営利栽培においては、一般的に黒ポリポットが利用されており、本実験で供試した素焼鉢とは根域の熱伝導率などが異なると考えられることから、実用性には課題が残る。今後はより実用に近いRECSの開発と実際栽培規模におけるエネルギー消費量についての比較および適応品目の拡大などについて検討する。

摘 要

冬季に加温を必要とするインパチェンスの生育・開花とエネルギー消費量に及ぼす根域加温の影響について検討した。最低気温と根域温度をそれぞれ13°C／無加温、8°C／無加温、8°C／13°C、8°C／18°Cに設定した4区を設け、根域環境制御システム（RECS）を用いてインパチェンスを2014年2月1日から4月22日まで栽培した。葉数、葉面積、地上部の乾物重、花数は8°C／18°C区で最も多くなった。葉面積および地上部乾物重は平均根域温度が高くなるほど増加し、生育と平均根域温度の間には極めて高い相関関係が認められた。開花時期は13°C／無加温区と比べると、8°C／13°C区と8°C／18°C区において約10日間促進された。生育と開花が最も促進された8°C／18°C区の消費電力量は13°C／無加温区よりも32%削減された。

引用文献

- 新井 聡・和田朋幸・大石一史. 2009. 観葉植物の暖房方法と暖房費節減効果. 愛知農総試研報. 41: 85-92.
- Boyer, J. S. 1970. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean, and sunflower at various leaf water potentials. Plant Physiol. 46: 233-235.
- 神奈川県農業技術センター. 2012. 省エネルギー高生産を目指したバラ株元加温技術. p. 4-5.
- 窪田 聡・遠藤路子・林 里紀・高橋博徳・村松嘉幸・腰岡政二. 2013. 根域環境制御システムによる根域温度調節はバーベナとゼラニウムの生育・開花に影響する. 園学研. 12: 97-102.
- 窪田 聡・遠藤路子・堀本大雅・村松嘉幸・腰岡政二. 2011. 根域環境制御システムにおける多孔質鉢の利用と機能. 園学研. 10: 461-466.
- 森山友幸・伏原 肇・奥 幸一郎. 2011. 株元加温が促成ナスの着果、収量、品質に及ぼす影響. 園学研. 10: 545-550.
- 村松嘉幸・河野寿紀・窪田 聡・腰岡政二. 2015. 高温期の根域冷却によるミニシクラメンの生育・開花促進. 園学研. 14: 267-272.
- Nagasuga, K., M. Murai-Hatano and T. Kuwagata. 2011. Effects of low root temperature on dry matter production and root water uptake in rice plants. Plant Prod. Sci. 14: 22-29.
- 西村元男. 1994. 生育と生理・生態（インパチェンス）. 農業技術大系花卉編8. 1・2年草. p. 7-8. 農文協. 東京.
- 農林水産省. 2008. 施設園芸省エネルギー型栽培の推進方向について. p. 4.