

トマトの周年安定生産を目的とした 局所温度制御システムの開発に関する研究[†]

河崎 靖

(平成 28 年 11 月 30 日受理)

Development of Local Temperature Control Systems for Year-Round and Stable Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Production

Yasushi Kawasaki

目次

I 緒言	36	V 冬季の低温期における茎頂部の局所的な加温が果 実の収穫量および燃料消費量に及ぼす影響	56
II 夏季の高温期における根域の局所的な冷却が根の 活性と植物成長調整物質および内部形態に及ぼす 影響	39	1 茎頂部の局所的な加温の強さが果実の収穫量 に及ぼす影響	56
a 緒言	39	a 緒言	56
b 材料および方法	39	b 材料および方法	56
c 結果	41	c 結果	57
d 考察	43	d 考察	59
III 冬季の低温期における根域の局所的な加温が根の 生育と果実の収穫量に及ぼす影響	45	2 茎頂部の局所的な加温が燃料消費量に及ぼす 影響	60
a 緒言	45	a 緒言	60
b 材料および方法	45	b 材料および方法	60
c 結果	46	c 結果	61
d 考察	49	d 考察	62
IV 夏季の高温期における茎頂部の局所的な冷却が着 果と果実の収穫量に及ぼす影響	51	VI 総合考察	64
a 緒言	51	VII 摘要	66
b 材料および方法	52	引用文献	68
c 結果	53	Summary	71
d 考察	54		

〒 305-8519 茨城県つくば市観音台 3-1-1

野菜生産システム研究領域

[†] 本論文は東北大学学位審査論文(平成 27 年 3 月, 農博第 1107 号)を基に編集・加筆したものである。本報告の一部は, 園学研, **9**, 345-350 (2010); 園学研, **10**, 395-400 (2011); *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, **82**, 322-327 (2013); *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, **83**, 295-301 (2014); 植物環境工学, **27**, 137-143 (2015) において発表した。

I 緒言

トマト (*Solanum lycopersicum* L.) は南アメリカ大陸北西部の高原地帯が原産とされ、世界における2011年の生産量はおよそ1億6,000万tと、世界で最も多く生産されている野菜である (FAOSTAT, 2011)。トマトの野菜としての栽培は、8世紀頃に中央アメリカで始まり、16世紀初頭に原産地からヨーロッパへもたらされた時は、専ら観賞用として利用されていたと言われている。その後、17世紀初頭から食用として用いられ、南ヨーロッパを中心にソース、煮込み用の食材として急速に発展してきた。わが国へは江戸時代に渡来し、当初は観賞用として栽培されていたが、食用としての栽培が始まったのは明治の初頭で、普及し始めたのは明治時代末頃であると言われている (望月, 2010)。

現在、トマトはわが国において最も重要な野菜の一つとなっている。2011年におけるトマトの果実の収穫量は70.3万t、卸売価額は2,080億円であり (農林水産省統計部, 2013a, 2013b)、農産物の卸売価額の中ではコメに次ぐ第2位に位置している。栽培面積はおよそ12,500haで、そのうちの約6割 (7,500ha) が施設での栽培である (農林水産省統計部, 2011)。トマト生産の特徴として、他の野菜品目と比較して産地の分散が大きい、すなわち、全国各地で生産されていることが挙げられる。これは、トマトが周年を通じて需要があり、地域間でのリレー栽培による周年供給が確立されていることや、生育適温の幅が広く、施設内の環境制御技術の発達によって、地域や季節を問わずに栽培が可能になっていることなどが要因として挙げられる。

このように、トマトは寒冷地から温暖地、もしくは低温期から高温期まで、様々な環境条件下で栽培されている野菜である。これは、トマトの生育適温の適切な理解と、施設栽培の普及、そして暖房機をはじめとする環境制御機器の活用によって実現している。トマトの生育適温に関する研究は、古くはWent (1943, 1944a, 1944b, 1945) の、人工気象室を用いた温度制御による栽培試験によって始められている。その結果として、昼の温度に対して夜間の温度を低く保つことで、昼夜の温度が一定の条件よりも生育が促進されること、生育ステージによって生育適温が異なること、品種間で適温に差があることが明らかとなっている。その後、藤井・石井 (1947)、Wittwer・Teubner (1955, 1957)、斎藤・伊東 (1962, 1971)、堀・新井 (1971) などの研究によって、様々な環境条件、生育ステージおよび品種で、ト

マトの栄養成長と果実生産における適温の検討が、より詳細に行われた。その結果、研究報告によって多少の差異はあるものの、昼温25℃前後、夜温10～20℃程度が栄養成長と果実生産に適切であることが明らかとなっている。また、生育ステージが進むに伴って適温域が低温側に変わること、品種によって適温域に違いがあることが再確認された。この中で、斎藤・伊東 (1962) は、17℃、24℃、30℃の夜温でトマトを育苗して、その後の果実の収穫量とそれに関連する形質を調査した結果、高夜温ほど果実の収穫量と乾物率は減少し、収穫が遅れることを明らかにしている。この原因に、夜間の温度の上昇によって花芽が小さくなること、呼吸消耗による炭水化物の消耗などのほか、根の呼吸速度の劇的な増加 (地温が10℃上昇すると呼吸速度はおよそ2倍に増加) が挙げられている (Atkinら, 2000)。その後、土岐 (1970, 1975) によって光合成産物の転流の時間変化と呼吸消耗の温度依存性に基づいた、より精密な温度管理方法が提唱された。すなわち、光合成産物の転流が盛んな夕方から前夜半は温度を高め管理して転流を促進し、後夜半は呼吸消耗を抑えるために低温で管理するという手法である。これは後に¹⁴Cを利用した光合成産物の転流と分配を調べた研究によって、夜間の光合成産物の果実への転流は、適温の範囲では高温ほど促進され、その大部分が前夜半に行われるという仕組みを適切に反映させた手法であることが明らかとなった (Hori・Shishido, 1977; 吉岡ら, 1977; 吉岡・高橋, 1981)。そのため、前夜半は、呼吸消耗の温度に対する依存性と (Hewitt・Curtis, 1948; Nightingale, 1933)、温度管理にかかる費用を考慮して、前述の適切な夜温の範囲で高めの温度に設定することで、葉から果実への転流を効率よく行い、後夜半は、障害が発生しない程度に低温で管理することで、呼吸消耗と温度管理にかかる費用を抑える方法が、生理学的に有効であることが証明された。さらに、光合成産物の転流と分配の解析の結果から、高夜温で管理すると花や果実や茎頂部への転流と分配が多くなり、低夜温で管理すると根への転流と分配が多くなるということが明らかにされた。このことは、高夜温で管理すると果実生産と茎葉の成長が一時的に増大するが、根への分配が減少して根の生育が低下するので、成り疲れ現象を起こすこと、一方、低夜温で管理すると、その反対の現象を起こすので、長期間継続して果実生産を高く維持するためには、適度な低夜温で管理することの必要性が裏付けられたのである。これにより、土岐の提唱した温度管理方法は変夜温管理法として普及が進んだ。現在の温度

管理方法もこの理論に基づいた設定となっている場合が多く、先進的な設備を備えたトマトの生産圃場では、さらに細かな温度制御方法が実施されている。海外でも、“Split-night temperatures”として同様の温度管理方法が提案されている（Gentら、1979）。この方法は、考え方は変夜温管理法と同じであるが、燃料消費量の削減に重点を置いた温度管理技術となっているので、前夜半は光合成産物の果実への転流を維持する目的で、慣行の暖房方法と同じ温度とし、後夜半は栄養成長や果実発達に影響を及ぼさない程度に、温度を慣行より下げることで、およそ20%の燃料消費量の削減に成功している。

最適な温度に関する研究の中で、昼夜の温度差（difference；DIF）についても多くの報告がある。しかし、DIFが大きいほど果実の収穫量は多くなるという報告がある一方（Gent、1984；Gent・Ma、1998）、DIFが小さいほど果実の収穫量は多くなるという報告もあって（De Koning、1988）、傾向は一致していない。このことから、現在ではDIFの影響は小さく、1日の平均温度の影響が大きいという考えが広く支持されている（Papadopoulosら、1997）。

近年の園芸施設においては、施設の高度化が進み、より高度な環境制御が可能になってきている。たとえば、ヒートポンプや（De Gelderら、2005）、細霧冷房装置など（Peet・Wells、2005）、湿度調節や冷房機能を有する装置が開発されて、先進的な生産者を中心に導入が進んだことが主な要因である。これによって、今まで商業的生産が困難であった、より高い温度環境下でのトマト生産が可能となることが期待されている。それが実現すれば、高温期の冷房と低温期の暖房とを組み合わせ、周年生産に向けて今までより幅広い作型の開発が可能となる。周年生産には年間合計した果実の収穫量の増加による収益増加と、定時定量出荷による業務用または契約栽培への対応、および1年を通じた雇用の継続による労働力の安定化など、多くの恩恵を受けることができる。施設園芸の先進国であるオランダでは、わが国と比べて夏季の気温が低いことや、燃料のコストが低く、安価な暖房が可能であることなど、比較的有利な条件下にあるが、コンピューターによって温度制御のみならず、光、CO₂、湿度、養水分管理まで統合した環境制御が行われている。特に、CO₂施用を行うことで植物の光合成を促進し、冷房技術を利用することで施設内の温度上昇を抑えて換気を抑制する、半閉鎖管理（Semi-closed Management）と呼ばれる方法が近年になって開発された。その結果、施設内のCO₂濃度が高く維持され、光

合成の促進による果実の収穫量の飛躍的な増加が実現している。現在では、オランダの単位面積当たりの果実の収穫量は、わが国の2倍以上と極めて高い（斉藤、2012）。果実の収穫量に大きな差がついている大きな要因としては、この環境制御方法の精密さが挙げられる。オランダでは前述のように多数の項目を統合的に管理しているのに対し、わが国では多くの生産者が温度のみを管理し、その管理方法もオランダと比べて精密さに欠けているためであると考えられている。このような中、わが国でもトマトの多収生産の実現を目的として、多数の環境制御機器を備えた高機能の施設である太陽光利用型植物工場の推進や（星、2009）、技術集約および品種選定による生産量の倍増と収益の増加を目指したスーパーホルトプロジェクトの発足など（木田ら、2007）、多様な試みが実施されており、今後の研究成果が期待されている。

環境制御技術の中で、暖房に着目すると、わが国で暖房に用いられる燃料は、95%以上が重油、灯油などの化石燃料となっている（林、2003）。したがって、原油価格の変動によって暖房経費は大きく増減する。たとえば、1970年代に起こった2度のオイルショックは暖房費の大幅な増加を招き、その対策として様々な省エネルギー技術の開発が検討されたことがある（島地、2003）。その結果、前述の変夜温管理法のような省エネルギー栽培技術が開発され、広く普及するに至った。その後、2000年代までは原油価格が低く安定したので、変夜温管理法のような一部の技術を除いて、省エネルギー技術の利用面積は減少した（農林水産省統計部、2011）。しかし、2005年頃から再び顕在化した重油価格の高騰によって、施設生産における暖房用のA重油の価格が、高騰前の45円・L⁻¹からピーク時には120円・L⁻¹を超えるまでに急騰した（農林水産省統計部、2012）。その後、A重油の価格は一時的に下落したものの、現在に至るまで再び価格は上昇してきているので、トマト生産者の経営が圧迫されている。その対策として、オイルショックの際に活用が検討され始め、近年その性能が飛躍的に向上しているヒートポンプが注目されている。ヒートポンプは施設内の空気と、施設外の空気または水とで熱交換を行って温度を制御する装置である。動力源として電気を用いるので、暖房費の変動が小さいという利点がある。しかし、化石燃料を利用する暖房機と比較して初期投資が依然として高額であり、一部の先進的なトマト生産者や花き生産者を除き、普及が進んでいない（林、2009）。

一方、高温期に利用される環境制御方法には遮光や冷房がある。冷房の方法としては、ヒートポンプによって施設内の熱を屋外へ放出する熱交換方式と、水の気化潜熱によって施設内の温度を低下させる細霧冷房方式やパッドアンドファン方式が主流である。ヒートポンプは暖房に加えて除湿も可能であることから、年間を通じて多目的な利用が期待できるが、初期投資、ランニングコストともに高額であること、さらに日中の冷房は負荷が大きすぎるため、洋ランなどの単価の高い一部の園芸作物を除いて、経営的に見合わないといわれている(林, 2003)。そのため、トマトの栽培では育苗時などの特殊な場合を除き、冷房目的でのヒートポンプの導入はされていない。一方、水の気化潜熱を利用した冷房方式は、初期投資、ランニングコストとも比較的安価であり、日中の利用も可能であるが、水の蒸発に伴って湿度が上昇するので、温度と同時に湿度も制御する必要がある。このことから適切な運用は難しく、現在も多くの研究が行われているもの(Handartoら, 2006, 2007; 片岡ら, 2001; 安場ら, 2009)、あまり普及していない。

高度な環境制御技術の普及においては、コストの増大という問題点と同時に、CO₂排出量の増加についても問題を抱えている。わが国の全農林水産業におけるCO₂排出量のうち、施設園芸が占める割合は45%と極めて高く、1990年度から2005年度までに2倍以上に増加している(及川, 2007)。地球温暖化を促進するとされるCO₂の排出量の削減は、世界規模でその重要性が認識されているので、施設園芸の分野においても、この問題は早期に解決すべき重要な課題となっている。

このように、高度環境制御技術によるトマトの生産には、コスト面やCO₂排出量の削減で多くの課題が残されているので、環境制御の有効性を維持し、かつ導入コストの低減、消費エネルギーの削減およびCO₂排出量の削減が可能となる技術の開発が強く求められている。そこで本研究では、トマトの生育適温および温度障害の発生する温度が部位ごとに異なることに着目し、低温障害や高温障害を受けやすい部位を局所的に加温または冷却(局所温度制御)する方法を用いて、従来の施設全体を均一に温度制御する方法と同等の果実の収穫量を得ながら、導入コストおよび消費エネルギーの削減を達成することを目標にして、トマトの生育や果実の収穫量に及ぼす影響について検討することとした。

施設生産における温度制御方法の基本は、施設全体を均一に加温または冷却し、場所による温度ムラをなくすことである。そのために、送風ダクトの効率的な配置方

法や(守田・村田, 1975; 守田ら, 1976)、循環扇の導入が検討されてきた(松村ら, 2003)。一方、植物の温度反応は部位によって異なり、生育適温や障害が発生する温度も部位によって異なっている。一般に、細胞分裂が盛んな茎頂の成長点部、根および花器は、生育適温の幅が狭く、低温でも高温でも障害を受けやすく、肥大後期の果実や茎葉は比較的障害を受けにくいことが知られている。たとえば、トマトの花では適温を外れると花粉稔性が低下し(Picken, 1984)、着果率が低下するため、果実の収穫量に多大な影響を及ぼす。一方、低温期の栽培事例であるが、トマト栽培における摘心後に、適切な地温を保てば、最低気温を5℃程度まで低下させても、果実の収穫量に影響がないという報告もある(田中・安井, 1986)。そのため、温度障害を受けやすい部位を局所的に加温・冷却し、障害が比較的起こりにくい部位は積極的な温度制御を行わないことで、施設全体の温度を均一に制御する場合と比べて少ない投入エネルギーで同程度の果実の収穫量が得られると期待される。

局所的な温度制御方法に関して、まず根に着目すると、根域の温度は温室内全体の温度とは独立して制御が可能なることから、温室内全体の温度と並行して最適な温度が検討されてきた。たとえば、Lingle・Davis (1959)は根域の温度を50～85°F(10～29.4℃)の間で4段階に分けてトマトの生育を調査して、高い根域の温度で栄養成長と養分吸収が促進されることを示した。また、藤井ら(1962)は生育ステージによる適温の変化を示し、生育が進むに伴って適切な根域の温度は低下することを明らかにした。藤重・杉山(1968)はトマトにおける根域の温度の適温範囲を示し、およそ20～30℃で生育が良好で、それより高温または低温の場合の生育は抑制されることを示した。堀ら(1968)、Shishido・Hori (1979)、およびGosselin・Trudel (1983a)も、根域の温度の変化がトマトの生育に影響を及ぼすことを言及しており、温室内全体の温度変化ほど影響は大きくないが、一定の影響があることを示している。トマトの生育に影響を及ぼす根域の温度の制御による生理的変化としては、根への光合成産物分配の促進(Bugbee・White, 1984; 宍戸・熊倉, 1994)、根の生育促進(Morgan・O'haire, 1978; Tindallら, 1990)、吸水および養分吸収の促進(Gosselin・Trudel, 1983b; Nkansah・Ito, 1995a)、葉面積の増加(Nkansah・Ito, 1995a)、光合成の促進が報告されており(Nkansah・Ito, 1995b)、これらの複合的な要因によって、果実の収穫量の増加に繋がると考えられる(藤重ら, 1991; Gosselin・Trudel, 1984; 佐々木・板木, 1989)。

しかし、根域の温度の制御による根の生理的影響について、根の生育促進および吸水・養分吸収の増加の根拠となる報告は少なく、また、形態的变化についての報告は見当たらない。そこで本研究では、II章として、夏季の高温期におけるトマトの根域の局所的な冷却、III章として、冬季の低温期における根域の局所的な加温を行い、特に根の生理的・形態的影響を明らかにすることを目的に実験を行うこととした。

次に、茎頂の成長点部や花に着目すると、わが国で栽培されているトマトの品種は多くが非心止まり性であり、花房直上に展開する葉、すなわち分化の上では最上位葉に相当する葉の側枝が主枝のように伸長する。このような分枝は単軸性仮軸分枝と呼ばれる(田淵, 2007)。トマトの栽培では、この側枝を伸長させ、残りの側枝は摘除する1本仕立てが主流であり、斜め誘引やつる下ろしなどの誘引法によって栽培するのが一般的である(青木, 1997)。この場合、茎頂の成長点部と開花花房は互いに近接しているので、同時に温度を制御することが可能と考えられる。そこで、IV章とV章では、茎頂の成長点部と開花花房(以下、茎頂部と表す)の局所的な温度制御方法について検討することとした。茎頂部の局所温度制御に関する研究は極めて少なく、トマトに関しては、森山ら(1999)が保温用の電球を用いた花房への熱線照射によって、花粉発芽率が向上したことを報告した例があるのみである。一方、茎の伸長性が小さいイチゴではいくつかの報告があり、クラウンと呼ばれる短縮茎の茎頂部の温度を制御することで、温室全体を加温する慣行の温度管理方法と比較して、花芽分化の促進、果実の収穫量の増加、消費エネルギーの削減などに効果があることが認められている(壇ら, 2005; 佐藤・北島, 2010; 曾根ら, 2007)。したがって、トマトでも同様の効果が得られると期待される。そこで本研究では、IV章として、夏季の高温期に茎頂部を局所的に冷却し、V章として、冬季の低温期に同部位を局所的に加温することで、果実の収穫量に及ぼす影響について検討することとした。また、V章では、局所的な暖房に要する燃料消費量の削減効果についても調べることにした。

本論文の作成に当たり、ご指導頂いた東北大学大学院農学研究科園芸学研究室の金濱耕基前教授に深く感謝する。また、本研究を行うに当たり、貴重なご助言を頂いた金山喜則教授に深く御礼申し上げる。ゼミ等を通じて、本研究に対して多くの助言を頂いた、園芸学研究室の皆様にも心から御礼を申し上げます。

II 夏季の高温期における根域の局所的な冷却が根の活性と植物成長調整物質および内部形態に及ぼす影響

a 緒言

トマトでは、夏季の高温期に根域の温度を25℃に冷却すると、冷却しない場合と比べて葉面積や草丈が増加し、栄養成長が促進され、果実の収穫量が増加することが報告されている(藤重ら, 1991; Nkansah・Ito, 1994)。さらに、根域の温度を20℃まで冷却した場合も、果実の収穫量が増加することが確認されている(佐々木・板木, 1989)。根域の局所的な冷却(以下、根域冷却と表す)によるトマトの生育促進と果実の収穫量の増加は、光合成速度の向上(Nkansah・Ito, 1995a)、吸水量と養分吸収量の増加(Klockら, 1997; Nkansah・Ito, 1995b)、および高い根域の温度による根の呼吸速度の低下の緩和によるものと考えられ(Klockら, 1997)、概ね25℃付近が最適と考えられている。しかしながら、根域冷却による根の生理状態や栄養状態の変化に関しては不明な点が多く、特に根の植物成長調整物質の含量や形態的な変化については明らかではない。そこで本章では、根域冷却がトマトの初期生育に及ぼす影響についての基礎的知見を得ることを目的として、根域冷却の有無による部位別の生育と栄養状態の変化および根における植物成長調整物質の含量や生理活性と形態変化を明らかにすることとした。

b 材料および方法

1) 栽培概要

トマトの‘桃太郎ヨーク’(タキイ種苗(株))を、2012年6月15日に、パーミキュライトを充填した72穴セルトレイ(29cm×59cm)に播種し、25/20℃(昼/夜温)の人工気象室内で3週間育苗した。その後、7月6日にガラス温室内のNFT(Nutrient Film Technique)ベッドに移植した。ガラス温室は、室温25℃で換気した。培養液の養分組成は、培養液1g当たりの元素の含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)で、N:82, P:15, K:134, Ca:55, Mg:12, Fe:1.3, Mn:0.4, B:0.3, Zn:0.04, Mo:0.01, Cu:0.01とした。根域冷却は、NFTベッドに移植して5日後に開始した。培養液の温度が25℃以上になると、培養液のタンクに接続したチラー(LX120-EXA型, REI-SEA(株))が作動し、培養液の温度が25℃未満になるように冷却した。根域冷却は14日間行った。NFTベッドに移植した株の半数は根域冷却をしない対照区とし、根域冷却区と比較した。根域冷却処理期

間中の日平均室温は 30.8℃, 最高と最低室温は, それぞれ 38.3℃と 24.7℃であった. 培養液の日平均温度は根域冷却区で 24.7℃, 対照区で 33.7℃であった.

2) 根の生理活性および根と地上部の乾物重の測定方法

根域冷却処理の開始 0 日, 7 日および 14 日後 (展開葉数は, それぞれ 7~9 枚, 10~12 枚および 13~16 枚) に, 以下の調査を行った. まず初めに, 生理活性の指標の 1 つとして, 出液速度を測定した. 出液速度は, 第 1 本葉の直下で茎を切断し, 子葉を取り除いたのちに茎の切断面に脱脂綿を取り付けて, 出液水を 10 分間採取し, 1 時間当たりの出液量 ($\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$) を求めた (中野ら, 2008b; 山口ら, 1995). 次に, よく発達した側根の一部 (0.1~0.6gDW 相当量) を 30℃, 500mL の培養液中に浸漬して, 攪拌しながら酸素の消費速度 ($\text{mgO}_2\cdot\text{min}^{-1}$) を酸素電極 (D-55 型, HORIBA (株)) を用いて測定した. その後, 浸漬した根を取り出して, 80℃の乾燥機で 24 時間以上乾燥させ, その乾物重を測定して, 根の乾物重当たりの呼吸速度 ($\text{mgO}_2\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}\cdot\text{min}^{-1}$) を算出した. 出液速度と根の呼吸速度の測定は, 9:00~15:00 の間に行った. その後, 根と地上部に分けて, 80℃の乾燥機に入れ, 48 時間以上乾燥させたのちに乾物重を測定して, 次の式により根と地上部の相対成長速度 (RGR) を求めた.

$$\text{RGR} (\text{day}^{-1}) = (\ln W_2 - \ln W_1) / (t_2 - t_1)$$

ここで, t_1 は調査日における根域冷却処理開始後日数を示し, W_1 はそのときの地上部もしくは根の乾物重 (gDW) を示す. 同様に, t_2 は t_1 以降の調査日における根域冷却処理開始後日数を示し, W_2 はそのときの地上部もしくは根の乾物重 (gDW) を示す. 出液速度と根の呼吸速度の調査は 6 反復, 乾物重と RGR の調査は 8 反復行った.

3) 養分の定量方法

対照区と根域冷却区において, 根域冷却処理開始 0 日, 7 日および 14 日後に, 根と地上部を, それぞれ 8 個体ずつ採取して 80℃の乾燥機に入れ, 48 時間以上乾燥させた. その後, 乾燥試料を粉碎して, その中から 50mg を秤量し, 6.7M の硝酸 10mL と 30% の過酸化水素水 2mL を加えて加熱し, 試料を分解した. 加熱にはマイクロ波分解装置 (START D 型, マイルストーンゼネラル (株)) を用いて, およそ 180℃で 20 分間加熱した. その後, 200mL に定容して, 高周波プラズマ発光分析装置 (SPS7700 型, 日立ハイテクサイエンス (株)) を用いて, P, K, Ca, Mg の元素濃度 (ppm) を測定

した. 得られた濃度から, 乾燥試料 1g 当たりの P, K, Ca, Mg の元素含量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) を求めた.

N の元素含量の測定には CN コーダー (JM1000CN 型, ジェイサイエンスラボ (株)) を用いた. 前述と同様に, 根と地上部の乾燥試料を粉碎し, その中から 50mg を秤量して CN コーダー内で燃焼させた. 燃焼に伴って発生する NO_2 の量を測定して, 乾燥試料 1g 当たりの N の元素含量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) を求めた.

4) 根の内生 IAA の定量方法

根のオーキシン活性について調査することを目的として, 根の新鮮重 1g 当たりのインドール-3-酢酸 (IAA) 含量を測定した. 凍結粉碎した根の約 1gFW を秤量して, 処理区と調査日ごとに 3 個体ずつ供試し, Dobrev・Kamínek (2002) と Matsuo ら (2012) の方法を参考にし, 以下に示す手順で IAA の分析を行った.

- ①試料に, 10mL の抽出液 (100% メタノール: 水: 100% ぎ酸 = 75:20:5) と, ^{13}C で標識した IAA を内部標準として 50 μL 加え, 4℃で 1 晩静置した.
- ②7000rpm で 10 分間遠心分離して, 上澄み液を回収した.
- ③上記②の残さに上記①の抽出液 5mL を加え, 4℃で 30 分静置した.
- ④上記②と同様の手順で上澄み液を回収し, 上記②の上澄み液と混合した.
- ⑤1M のぎ酸を通過させたフィルター (OasisHLB 200mg 型, Waters, Co., Ltd.) に, 上記④で混合した上澄み液を通過させた. 通過液は廃棄した.
- ⑥上記⑤のフィルターに, 上記①の抽出液 5mL を通過させて, IAA の含まれる通過液を回収した.
- ⑦上記⑥で回収した溶液を, エバポレーターを用いて 40℃で乾固した後, 1M のぎ酸を添加して溶解した.
- ⑧1M のぎ酸を通過させたフィルター (OasisMCX 150mg 型, Waters, Co., Ltd.) に上記⑦の溶液を通過させて, 通過液を廃棄した後, 5mL のメタノールを通過させて IAA の含まれる通過液を回収した.
- ⑨上記⑧で回収した溶液を, エバポレーターを用いて 40℃で乾固した後, 1% の酢酸 3mL を添加して溶解した.
- ⑩1% の酢酸を通過させたフィルター (OasisWAX 60mg 型, Waters, Co., Ltd.) に上記⑨の溶液を通過させた後に, 3mL の 1% 酢酸と 6mL の 100% メタノールを順に通過させた. 通過液はすべて廃棄した.
- ⑪酢酸とメタノールの混合液 (100% メタノール: 水: 100% 酢酸 = 80:19:1) 6mL を上記⑩のフィルター

に通過させて、IAAの含まれる通過液を回収した。

⑫上記⑪で回収したIAA溶液を、エバポレーターを用いて40℃で乾固した後、80μLの溶離液（水：100%メタノール：100%酢酸 = 80：19.95：0.05）を加えて、15000rpmで10分間遠心分離した。

⑬上記⑫で得られた上澄み液を高速液体クロマトグラフ質量分析装置（LC/MS/MS：Prominence20A型、島津（株）；3200QTrap型、AB Sciex, Co., Ltd.）を用いて、IAA溶液中のIAA濃度を内部標準との比較により測定した。

⑭IAA濃度からIAA含量を求めてから、根の新鮮重1g当たりの内生IAA含量（ng・g⁻¹FW）を求めた。

5) 根の形態の調査方法

根域冷却処理開始14日後に、対照区と根域冷却区から側根の先端部（根端からおよそ3cm付近の部分）を採取して、FAA液（100%ホルムアルデヒド：100%酢酸：100%エタノール：水 = 2：5：45：48）で固定した。その後、70%、80%、90%、100%のエタノールでFAA液をエタノールに置換して、テクノビット7100樹脂（Heraeus Kulzer, Co., Ltd.）で包埋した。包埋した根から、マイクロームを用いて厚さ2μmの切片を作成して、トルイジンブルーで染色後、光学顕微鏡（CX41型、

オリンパス（株））で横断面を観察し、写真を撮影した。各区、それぞれ4個体の切片について観察と撮影を行った。

c 結果

1) 根と地上部の生育および根の生理活性に及ぼす根域冷却の影響

根の乾物重は、根域冷却処理開始7日後においても、14日後においても、対照区と根域冷却区との間で差は認められなかった（図-1A）。また、対照区、根域冷却区とも、根域冷却処理開始7日後、14日後と、日数が経過するに伴って増加した。根のRGRは、根域冷却処理開始0～7日後において根域冷却区の方が対照区より高かったが、根域冷却処理開始7～14日後においては、対照区と根域冷却区との間で有意な差は認められなかった（図-1B）。また、対照区と根域冷却区ともに、根域冷却処理開始0～7日後から7～14日後にかけて根のRGRは低下した。低下量は根域冷却区の方が、対照区より大きかった。地上部乾物重は、根域冷却処理開始7日後において、根域冷却区の方が対照区と比べて小さかったが、根域冷却処理開始14日後においてその差は認められなかった（図-1C）。また、対照区、根域冷却区とも、根域冷却処理開始7日後、14日後と、日数が

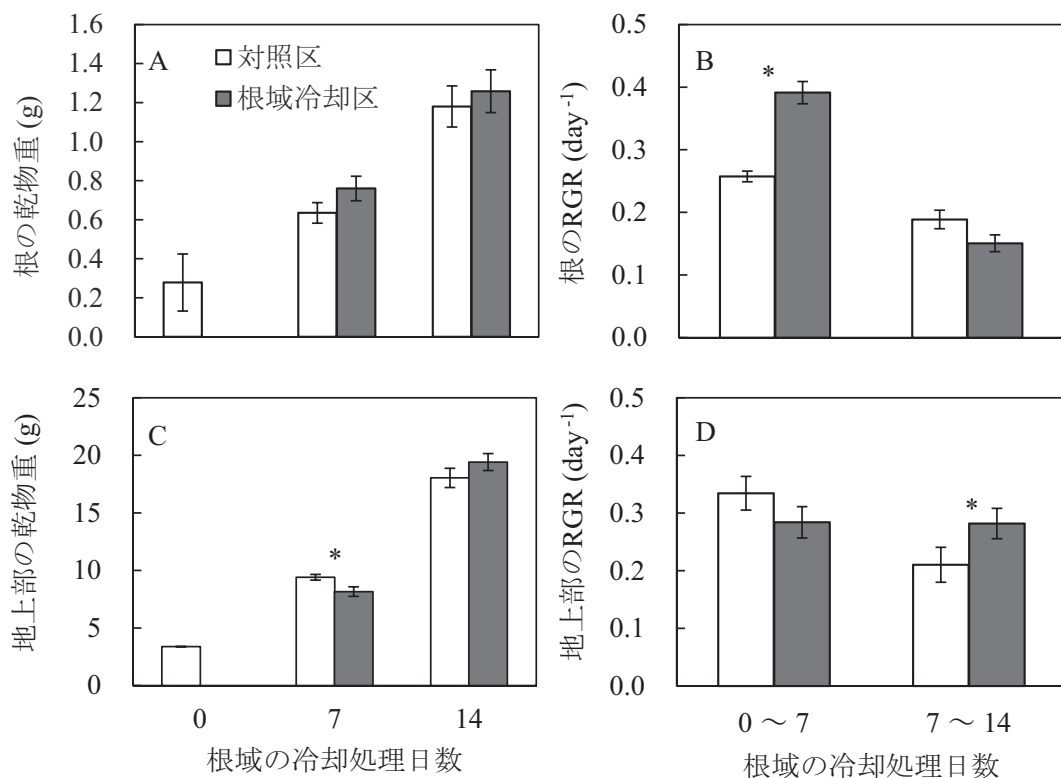


図-1 根と地上部の生育に及ぼす根域の冷却処理と冷却処理日数の影響

A：根の乾物重、B：根のRGR、C：地上部の乾物重、D：地上部のRGR

図中の縦棒線は標準誤差を示す（n = 8）

*：t検定により有意水準5%で差があることを示す

経過するに伴って増加した。地上部の RGR は、根域冷却処理開始 0～7 日後において、対照区と根域冷却区との間で差が認められなかったが、根域冷却処理開始 7～14 日後においては、根域冷却区の方が対照区より高かった (図-1D)。また、対照区における地上部の RGR は、根域冷却処理開始 0～7 日後から 7～14 日後にかけて低下したが、根域冷却区では根域冷却処理開始 0～7 日後から 7～14 日後にかけて変化は認められなかった。

出液速度は、根域冷却処理開始 7 日後においても、14 日後においても、根域冷却区の方が対照区より高かった (図-2A)。また、対照区では日数が経過しても変化しなかったが、根域冷却区では、根域冷却処理開始 7 日後、14 日後と、日数が経過するに伴って顕著に増加した。根の呼吸速度は、根域冷却処理開始 7 日後においては、対照区と根域冷却区との間で有意な差は認められなかったが、根域冷却処理開始 14 日後においては、根域冷却区の方が対照区より高かった (図-2B)。また、対照区と根域冷却区とも、根域冷却処理開始 7 日後に増加して、14 日後に減少した。

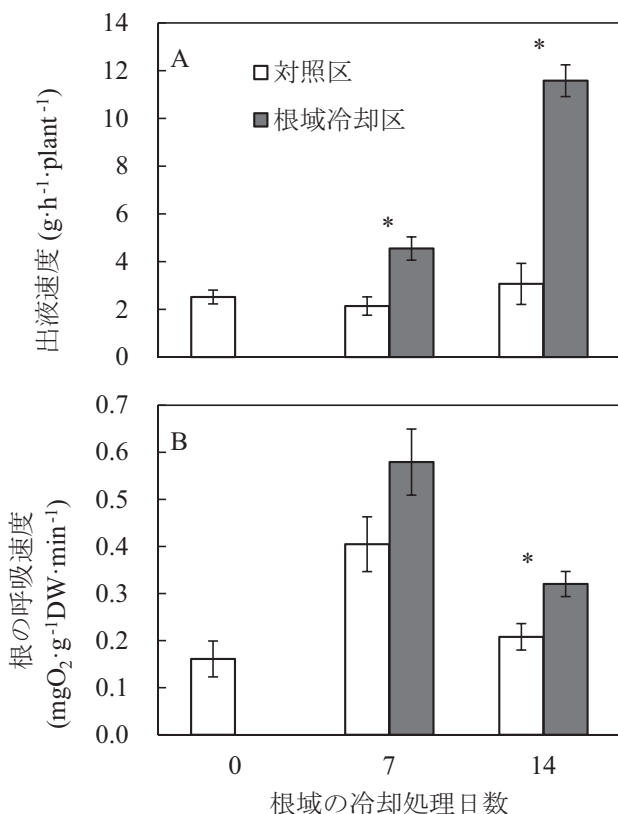


図-2 出液速度 (A) と根の呼吸速度 (B) に及ぼす根域の冷却処理と冷却処理日数の影響

図中の縦棒線は標準誤差を示す (n=6)

* : t検定により有意水準 5% で差があることを示す

2) 養分含量と根の内生 IAA 含量に及ぼす根域冷却の影響

根の N の含量については処理区間、根域の冷却処理日数間で変化は認められなかった (表-1)。根の P の含量は、根域冷却処理開始 7 日後においては、対照区と根域冷却区との間に有意な差は認められなかったが、根域冷却処理開始 14 日後においては、根域冷却区の方が対照区より有意に少なかった。また、対照区では、根域冷却処理日数が経過しても含量は変化しなかったのに対して、根域冷却区では、根域冷却処理開始 7 日後において根域冷却処理開始 0 日後と比べて有意に減少し、根域冷却処理開始 14 日後においても同様の傾向が認められた。根の K の含量は、根域冷却処理開始 7 日後において、根域冷却区の方が対照区より多くなったが、根域冷却処理 14 日後においては、対照区と根域冷却との間に有意な差は認められなかった。また、対照区では、根域冷却処理開始 7 日後において、根域冷却処理開始 0 日後と比べて有意に減少したが、根域冷却処理開始 14 日後においては、根域冷却処理開始 0 日後と有意な差は認められなかった。根域冷却区では、日数が経過しても含量の有意な変化は認められなかった。根の Ca と Mg の含量は、地上部と逆の傾向を示し、根域冷却処理開始 7 日後と 14 日後とも、根域冷却区の方が対照区よりも少なかった。また、対照区では、根域冷却処理開始 7 日後において根域冷却処理開始 0 日後と比べて有意に増加し、根域冷却処理開始 14 日後においても同様の傾向が認められた。一方、根域冷却区では根域冷却処理日数が経過しても含量の変化は認められなかった。

地上部の N の含量は、根域冷却処理開始 7 日後と 14 日後において、対照区と根域冷却区との間に有意な差は認められなかった。また、対照区では、根域冷却処理開始 7 日後において、根域冷却処理開始 0 日後と比べて有意に減少し、根域冷却処理開始 14 日後においても同様の傾向が認められたが、根域冷却区では、日数が経過しても含量の有意な変化は認められなかった。地上部の P と K の含量は、根域冷却処理開始 7 日後と 14 日後とも、対照区と根域冷却区との間に有意な差は認められなかった。また、対照区、根域冷却区とも、根域冷却処理開始 7 日後において、根域冷却処理開始 0 日後より減少し、根域冷却処理開始 14 日後においても同様の傾向が認められた。地上部の Ca の含量は、冷却処理開始 7 日後と 14 日後において、根域冷却区の方が対照区よりも有意に多かった。また、対照区では根域冷却処理日数が経過しても含量は変化しなかったのに対して、根域冷却区では根

表-1 根と地上部の養分含量に及ぼす根域の冷却処理の影響

根域の冷却 処理日数		根の含量 (mg · g ⁻¹ DW)					地上部の含量 (mg · g ⁻¹ DW)					1株当たりの含量 (mg · plant ⁻¹)				
		N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
0	対照区	41.8 a	8.7 a	32.2 a	5.2 b	7.4 b	39.4 a	5.9 a	51.2 a	16.5 c	5.6 a	143.2 a	22.0 a	178.5 a	56.4 a	20.8 a
7	対照区	37.3 a	8.3 ab	23.4 b	12.0 a	9.7 a	35.1 b	4.7 b	41.4 b	15.9 c	4.6 b	354.9 b	48.9 b	406.1 b	157.3 b	49.5 b
	根域冷却区	43.4 a	7.2 bc	33.0 a	4.5 b	7.2 b	38.0 ab	5.0 b	40.4 b	18.6 b	5.6 a	328.1 b	44.5 b	338.6 b	149.3 b	48.8 b
14	対照区	38.8 a	8.2 ab	32.4 a	13.0 a	9.2 a	35.0 b	4.8 b	40.9 b	16.0 c	4.5 b	672.9 c	95.8 c	766.2 c	300.8 c	90.9 c
	根域冷却区	41.0 a	6.2 c	35.0 a	5.3 b	6.5 b	37.9 ab	5.4 ab	38.3 b	21.5 a	5.4 a	807.2 d	112.7 c	786.4 c	426.8 d	112.4 d

同一列内で異なるアルファベット間には Tukey の多重比較により有意水準 5% で差があることを示す (n = 8)

域冷却処理日数の経過とともに含量は有意に増加した。地上部の Mg の含量は、冷却処理開始 7 日後と 14 日後において、根域冷却区の方が対照区より有意に多かった。また、対照区では根域冷却処理開始 7 日後において、根域冷却処理開始 0 日後と比べて有意に減少し、根域冷却処理開始 14 日後においても同様の傾向が認められたが、根域冷却区では日数が経過しても含量の有意な変化は認められなかった。

各部位の養分含量と乾物重を掛け合わせた、1株当たりの養分含量は、根域冷却処理開始 7 日後において、いずれの養分も根域冷却の有無による差は認められなかったが、根域冷却処理開始 14 日後の根域冷却区における N, Ca および Mg の含量は、対照区のそれらより有意に多く、P と K の含量は対照区と根域冷却区との間で有意な差は認められなかった。また、いずれの養分も、対照区、根域冷却区とも、根域冷却処理開始 7 日後、14 日後と、日数が経過するに伴って増加した。

根の内生 IAA 含量に関して、冷却処理開始 7 日後において、根域冷却区の方が対照区より高くなったが、冷却処理開始 14 日後では対照区と根域冷却区との間に有意差は認められなかった (図-3)。また、対照区では、日数経過による根の内生 IAA 含量に変化は認められなかったが、根域冷却区では冷却処理開始 7 日後において、冷却処理開始 0 日後より有意に増加し、冷却処理開始 14 日後では、冷却処理開始 0 日後と同じ水準にまで減少した。さらに、根の内生 IAA 含量と RGR との間には、有意な正の相関関係が認められた (図-4)。

3) 根の内部形態に及ぼす根域冷却の影響

根の横断面の面積は、根域冷却区が、対照区より明らかに肥大していた (図-5)。その中で、木部の肥大が特に顕著であって、皮層や師部の発達については、根域冷却処理の有無で差は認められなかった。

d 考察

トマトに及ぼす高温の影響については、昼/夜温を

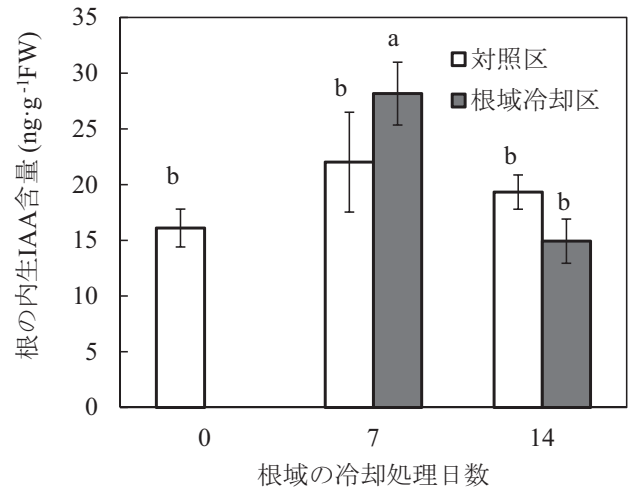


図-3 根の内生 IAA 含量に及ぼす根域の冷却処理と冷却処理日数の影響

図中の縦棒線は標準誤差を示す
異なるアルファベット間には Tukey の多重比較により有意水準 5% で差があることを示す (n = 3)

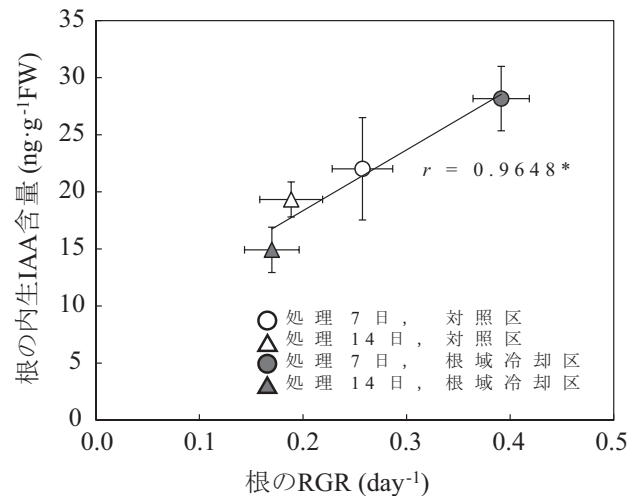


図-4 根の RGR と内生 IAA 含量との相関関係

図中の縦棒線と横棒線は標準誤差を示す
*: 有意水準 5% で相関があることを示す

40/23℃で栽培すると、26/22℃で栽培した場合と比べて、気孔コンダクタンス、蒸散速度および光合成速度が低下することが報告されている (Nkansah・Ito, 1995a)。また、30℃以上の気温では、それより低い気温と比べて RGR が低下することが認められている (Gent, 1986)。着果

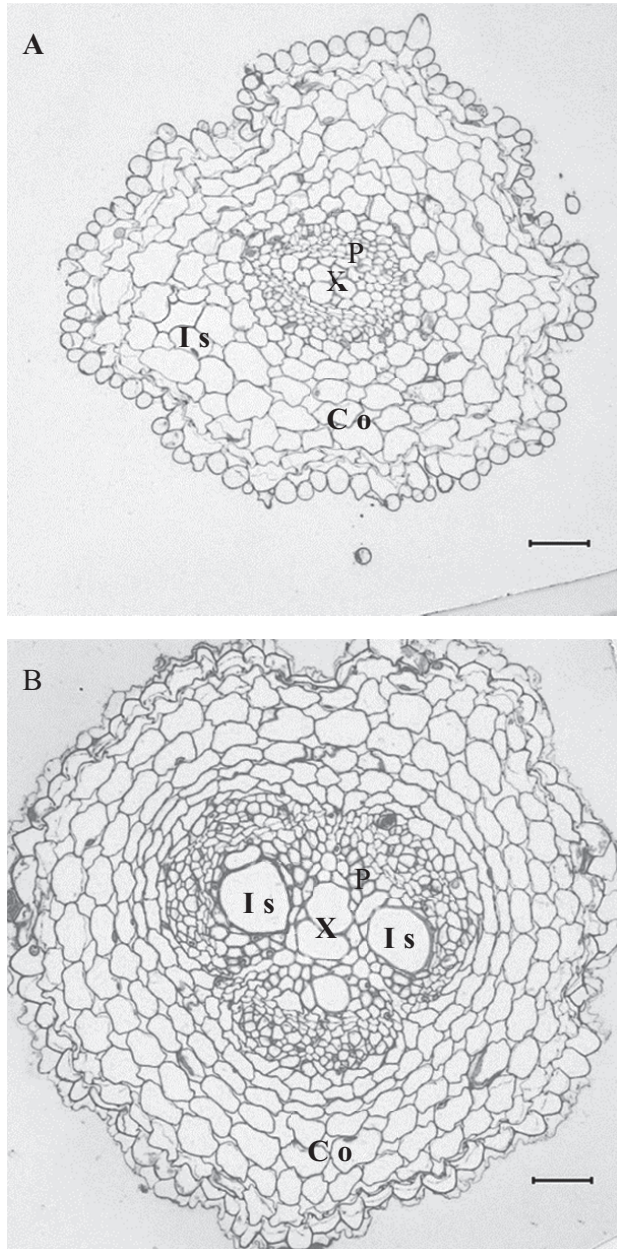


図-5 根の先端部近傍における横断面

A: 対照区, B: 根域冷却区
 根域冷却処理14日後に採取した根の顕微鏡画像を撮影した
 Co: 皮層, X: 木部, P: 篩部 Is: 細胞間隙
 スケールバー: 50 μ m

に関しては、昼/夜温が32/26℃の場合、28/22℃と比べて花粉の放出量が低下し (Satoら, 2006), 34/20℃では30/20℃と比べて着果率の低下が認められている (Sasakiら, 2005)。これらの研究例と照らし合わせると、日平均室温が30.8℃となった本実験における温度環境は、トマトの種々の生理的現象に大きな影響を及ぼし、ときには高温障害を引き起こすのに十分な高温であったものと推察された。

根域温度が生育に及ぼす影響について、トマトでは40/23℃の気温で根域温度が30℃の場合、同じ気温で根域温度が25℃の場合より、光合成速度と果実の収穫

量が低下することが認められている (Nkansah・Ito, 1995a)。トマト以外の作物でも、高い根域温度での生育抑制が認められた報告は多い (Benoit・Ceustermans, 2001; Du・Tachibana, 1994; Heら, 2001; 王・橘, 1996)。また、気温は高温ではないが、30℃を超える根域温度では、25℃前後の根域温度と比べて養分吸収が抑制され (Tindallら, 1990), 果実の収穫量が低下することも知られている (Gosselin・Trudel, 1983a)。このような例と照らし合わせると、本実験における対照区の根域温度 (1日平均で33.7℃) は、既報の高温障害が起こる温度 (30℃程度) より高かったため、対照区では高温障害が発生していたものと推察された。一方、本実験における根域冷却区の根域温度 (1日平均で24.7℃) は、好適とされる根域温度と言われている25℃に近かったため (Klockら, 1997; Nkansah・Ito, 1995a, b), 根域冷却区では、高温障害は発生していなかったと考えられた。

根域冷却が根の生育を促進する効果は、Nkansah・Ito (1994) の報告に一致した (図-1A, B)。さらに、トマトの根のRGRは根の発達とともに減少していくことが報告されているが (Pressmanら, 1997), この報告は、根域冷却処理の日数の経過に伴って根のRGRが低下した本実験の結果と一致した。根域冷却処理開始7日後における、根域冷却区の地上部の生育抑制 (図-1C, D) について、関連する知見は見当たらないが、根域冷却処理による一時的な温度ストレスを受けたのではないかと推察された。一方、その後の地上部のRGRは対照区より高かったため、出液速度や根の呼吸速度の増加およびNを中心とする養分吸収の促進などの根の生理・形態的特性の向上の結果として起こったものと考えられた。この結果は、Nkansah・Ito (1994) の結果を支持するものとなった。

出液速度と根の呼吸速度は、根の生理活性の指標として利用されることがある (中野ら, 2008b; 山口ら, 1995)。根の生理活性の向上は、水と養分の吸収を促進し (Klockら, 1997; 山口ら, 1995), 根域温度25℃で最大化することが知られている (Nkansah・Ito, 1995b)。このことと、本実験において根域冷却処理開始0日後から7日後にかけて、対照区と根域冷却区の根の呼吸速度が増加したことは、根域冷却処理開始0日後の根は、移植後間もないためにストレスを受けている状態であり、その後7日間でNFT水耕に馴化し、ストレスから回復したためであると推察された。また、根域冷却処理開始7日後から14日後にかけての根の呼吸速度

の減少は、根の生育による根端部の割合の低下が、主要因であると考えられた。本実験の根の呼吸速度は、よく発達した側根の一部を採取して測定しているため、根の伸長成長が進むほど呼吸速度の高い根端部の割合が低下し、結果として、根の呼吸速度が低下したのではないかと推察された。

トマトの養分含量と根域温度との関係について、昼40℃、夜23℃の気温において、葉のCaとMgの含量は、根域の温度が30℃の場合より25℃の場合の方が多くなることが報告されている(Nkansah・Ito, 1995b)。また、25℃の好適な気温での研究でも、同様の結果が報告されている(Kabu・Toop, 1970; Tindallら, 1990)。これらの報告は、本実験の結果と一致している。一方、根の養分含量と根域温度との関連を示した知見は見当たらない。本実験では、根のCaとMgの含量は地上部における結果と逆の傾向を示したことから、根域冷却区では、CaとMgの根から地上部への輸送が促進されているのに対し、対照区ではその輸送が十分ではなく、根への蓄積が進んでいる可能性が考えられた。対照区における地上部のNとMg含量が、日数経過によって低下したのも、高い根域温度による地上部への養分の輸送が、十分に行われなかったためであると推察された。

根の内生IAA含量に関して、シロイヌナズナ(*Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh.)を用いた研究では、根の成長を促進することが示されている(Novickénら, 2010; Ohashi-Itoら, 2013; Pittsら, 1998; Wilsonら, 1990)。この報告は、根の内生IAA含量と根のRGRとの間に高い相関が認められた本実験の結果と一致し、トマトにおいても、根の内生IAAが根の成長を促進していることが推察された。

根の内部形態に関して、根域温度との関連性を示唆した報告は見当たらないが、オーキシンが根の木部発達に作用することがシロイヌナズナを用いた研究で明らかにされている(Dengら, 2012; Ohashi-Itoら, 2013)。したがって、本実験における根域冷却処理による木部発達の促進は、根の内生IAA含量の増加が関与している可能性が考えられた。

以上より、夏季高温期におけるトマトの根域冷却は、根の生理活性の向上や、根の内生IAA含量の一時的な増加を引き起こし、それらが根の生育や木部発達を促進する結果として、Nを中心とした養分吸収と地上部への輸送促進に作用し、最終的に地上部の生育促進を引き起こしている可能性が示された。

Ⅲ 冬季の低温期における根域の局所的な加温が根の生育と果実の収穫量に及ぼす影響

a 緒言

トマトの根域の局所的な加温（以下、根域加温と表す）による変化として、内生植物成長調整物質の含量の変化(Aliら, 1996)、光合成産物の分配率の変化(宍戸・熊倉, 1994)、根の生育促進(Tindallら, 1990)、吸水量と養分吸収量の増加(Gosselin・Trudel, 1983b)、葉面積とガス交換速度の増加などが報告されている(Hurewitz・Janes, 1983)。しかし、これらの報告は、25℃付近に調節された好適な気温の下で、低い根域温度を対照として調べた研究であり、低い気温下での研究事例は少ない。果実の収穫量についても、低夜温条件下での根域加温によって増加を示唆する報告があるものの(Jonesら, 1978; Orchard, 1980)、知見は十分でない。さらに、根域加温による根の形態的な変化についての知見は見当たらない。

冬季の低温期におけるトマトの根域加温による、根を中心とした生理・形態的メカニズムを明らかにして、II章で調べた、夏季の高温期における根域冷却の際に認められた現象と比較することは、一連の根の温度反応を明らかにするうえで非常に重要な知見となる。また、得られた知見は、加温と冷却を組み合わせたトマトの周年にわたる根域温度制御技術の開発のための基礎的知見としても極めて重要である。

そこで、本章では、冬季の低温期にトマトの根域を加温し、短期的な影響として根の生理活性と形態の変化、根と地上部の生育および養分吸収について調査し、長期的な影響として乾物分配率および果実の収穫量を調査することとした。また、II章において調べた、夏季の高温期における根域冷却と比較し、生理活性の変化の違いを明らかにすることとした。

b 材料および方法

1) 栽培概要

トマトの‘桃太郎ヨーク’（タキイ種苗（株））を、2012年11月16日にバーミキュライトで充填した72穴セルトレイ（29cm×59cm）に播種し、25/20℃（昼/夜温）の閉鎖型苗生産システム（商品名「苗テラス」、MKVドリーム（株））内で3週間育苗した。その後、12月7日にガラス温室内のNFTベッドに移植した。着果と果実肥大の促進を目的として、3つの花が開花した花房に、順次0.15%の4クロロフェノキシ酢酸（商品

名「トマトーン」, 日産化学工業(株)の100倍液を噴霧した。トマトは第3果房上の本葉2枚を残して摘心した。ガラス温室は室温25℃で換気して, 最低夜温は温湯暖房を用いて5℃以上に保った。培養液の養分組成は, 培養液1g当たりの元素の含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)で, N:164, P:31, K:267, Ca:110, Mg:24, Fe:2.1, Mn:0.6, B:0.4, Zn:0.07, Mo:0.02, Cu:0.02として, 2週間に1度培養液を更新した。根域加温処理は, NFTベッドへの移植と同時に開始した。培養液タンクの内部にセラミックヒーターを設置し, 培養液の温度が18℃以下になると加温するように設定した。根域加温処理は栽培終了(2013年4月26日)まで行った。NFTベッドへ移植した株の半数を, 根域加温処理をしない対照区とし, 根域加温区と比較した。根域加温処理期間中の室温は平均16.2℃, 最高31.5℃, 最低5.9℃であり, 培養液温は根域加温区で平均20.3℃, 最低16.6℃, 対照区で平均14.2℃, 最低5.8℃であった。

2) 根の生理活性および根と地上部の乾物重の測定および果実の収穫調査の方法

根域加温処理開始0日(3~4葉期), 7日(4~5葉期)および21日(7~9葉期)後において, 12個体ずつ供試して, 以下の調査を行った。生理活性の指標の1つとして, II章と同様に, 出液速度を測定した。次に, 複数の良く発達した側根を25℃, 500mLの培養液中に浸漬しながら攪拌して, II章と同様に, 根の乾物重1g当たりの呼吸速度($\text{mgO}_2\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}\cdot\text{min}^{-1}$)を求めた。これらの操作はすべて9:00~12:00の間に行った。その後, 根と地上部に分けて, 80℃で3日間乾燥機に入れ, II章と同様に相対成長速度(RGR)を求めた。

3) 養分と根の内生IAAの定量方法

根域加温区と対照区において, 根域加温処理開始0, 7および21日後に, それぞれ根と地上部を12個体ずつ採取して80℃の乾燥機に入れ, 48時間以上乾燥させた。その後, II章と同様に, 乾燥試料1g当たりのN, P, K, Ca, Mgの元素含量($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)を求めた。

根のオーキシン活性について調査することを目的として, 根の新鮮重1g当たりのIAA含量($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)を測定した。根域加温区と対照区において, 根域加温処理開始0日, 7日および21日後に, 3個体ずつ供試した。IAAの抽出と分析はII章と同様に行った。

4) 根の形態の調査方法

根域加温処理開始21日後に, 対照区と根域加温区から採取した側根の先端部(根端からおおよそ3cm付近の部分)の横断面の顕微鏡写真を, II章と同様の方法で撮

影した。撮影した根の横断面の写真を画像処理プログラムで解析し(Yamamoto, 2000), 全断面積, 表皮と皮層および中心柱の断面積を求め, 全断面積における中心柱の断面積の割合と, 中心柱における木部の断面積の割合を算出した。各区3個体ずつの切片について解析した。

5) 果実の収穫量の調査方法

赤く熟した果実を収穫し, その合計重量を測定して総収量として表した。その後, 果実の乾物重を測定した。総収量を全収穫果数で除した値を1果重として表した。また, 収穫した果実の一部を赤道面で切断して, デジタル屈折糖度計(PR-101型, ATAGO(株))を用いて果汁の屈折計示度(度)を測定した。収穫終了後, 茎葉と根の乾物重を測定して, 茎葉, 根および果実の乾物分配率を求めた。

c 結果

1) 根と地上部の生育および根の生理活性に及ぼす根域加温の影響

根の乾物重は地上部の乾物重より変化が早く, 対照区, 根域加温区とも, 根域加温処理開始7日後, 21日後と, 日数が経過するに伴って増加した(図-6A)。また, 根域加温処理開始7日後においては, 根域加温区の方が対照区より有意に大きく, 同様に根域加温処理開始21日後においても, 根域加温区の方が対照区より有意に大きかった。根のRGRは, 根域加温処理開始0~7日後では根域加温区の方が対照区より高かったが, 根域加温処理開始7~21日後では有意な差は認められなかった(図-6B)。また, 対照区における根のRGRは, 根域加温処理開始0~7日後から7~21日後にかけて増加したが, 根域加温区では根域加温処理開始0~7日後から7~21日後にかけて変化は認められなかった。

地上部の乾物重は, 対照区, 根域加温区とも, 根域加温処理開始7日後, 21日後と, 日数が経過するに伴って増加した(図-6C)。また, 根域加温処理開始7日後では処理区間で差が認められなかったが, 根域加温処理開始21日後では根域加温区の方が有意に大きかった。地上部のRGRについても同様に, 根域加温処理開始0~7日後では, 根域加温区と対照区の間には差は認められなかったが, 根域加温処理開始7~21日後では, 根域加温区の方が対照区より高かった(図-6D)。

出液速度は, 根域加温処理開始7日後においても, 21日後においても, 根域加温区の方が対照区より高かった(図-7A)。また, 対照区において根域加温処理開始7日後では根域加温処理開始0日後から変化はなく, 根域加温処理開始21日後で増加した。一方, 根域加温区に

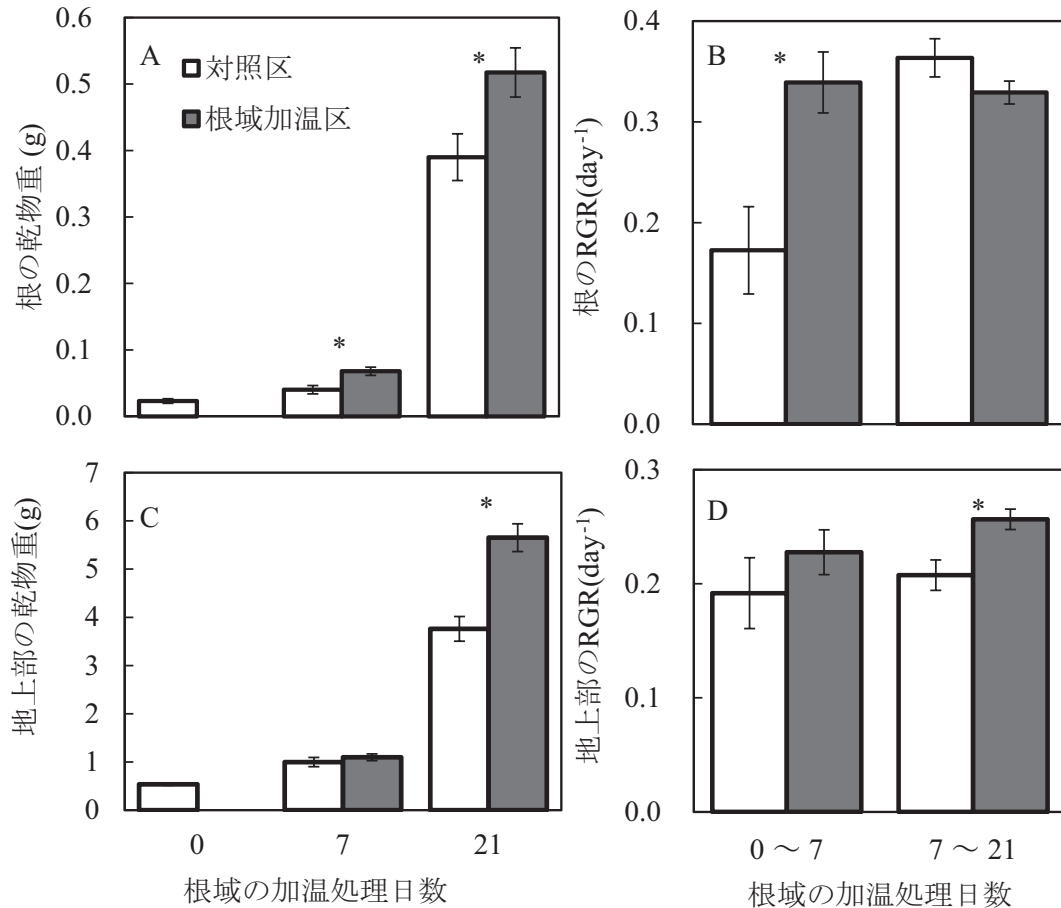


図-6 根と地上部の生育に及ぼす根域の加温処理と加温処理日数の影響

A: 根の乾物重, B: 根のRGR, C: 地上部の乾物重, D: 地上部のRGR

図中の縦棒線は標準誤差を示す (n = 12)

*: t検定により有意水準5%で差があることを示す

においては、根域加温処理開始7日後から増加した。

根の呼吸速度は、根域加温処理開始7日後においては、対照区の方が根域加温区より有意に高かったが、根域加温処理開始21日後では有意な差は認められなかった(図-7B)。また、根域加温処理開始時は高かったが、根域加温処理開始7日後と21日後においては低くなった。

2) 養分含量と根の内生 IAA 含量に及ぼす根域加温の影響

根における養分含量の変化は、元素ごとに傾向が異なった。Nの含量は、根域加温処理開始7日後も根域加温処理開始21日後も、対照区と根域加温区との間に有意な差は認められなかった(表-2)。また、対照区では日数の経過による変化は認められなかったが、根域加温区では、根域加温処理開始7日後と根域加温処理開始21日後において、根域加温処理開始0日後より有意に減少した。PとKの含量は、根域加温処理開始7日後において、根域加温区が対照区よりも高かったが、根域加温処理開始21日後においては対照区と根域加温区との間に有意な差は認められなかった。また、対照区にお

いても根域加温区においても、時間の経過に伴って含量は増加する傾向にあった。Caの含量は、根域加温処理開始7日後においては対照区の方が根域加温区より有意に高かったが、根域加温処理開始21日後では逆に、根域加温区の方が対照区より有意に高かった。また、対照区では根域加温処理開始21日後において根域加温処理開始0日後より有意に減少し、根域加温区では根域加温処理開始7日後と21日後において根域加温処理開始0日後より有意に減少した。Mgの含量は、根域加温処理開始7日後と21日後ともに、処理区間の有意な差は認められなかった。また、対照区では根域加温処理開始0日後と比較して根域加温処理開始7日後と21日後に低下したが、根域加温区では時間変化による含量の有意な変化は認められなかった。

地上部の養分含量については、K以外のすべての成分が、根域加温処理開始7日後と21日後において、根域加温区の方が対照区より高かった。Kの含量は、根域加温処理開始7日後において、根域加温区の方が対照区より高かったが、根域加温処理開始21日後においては、

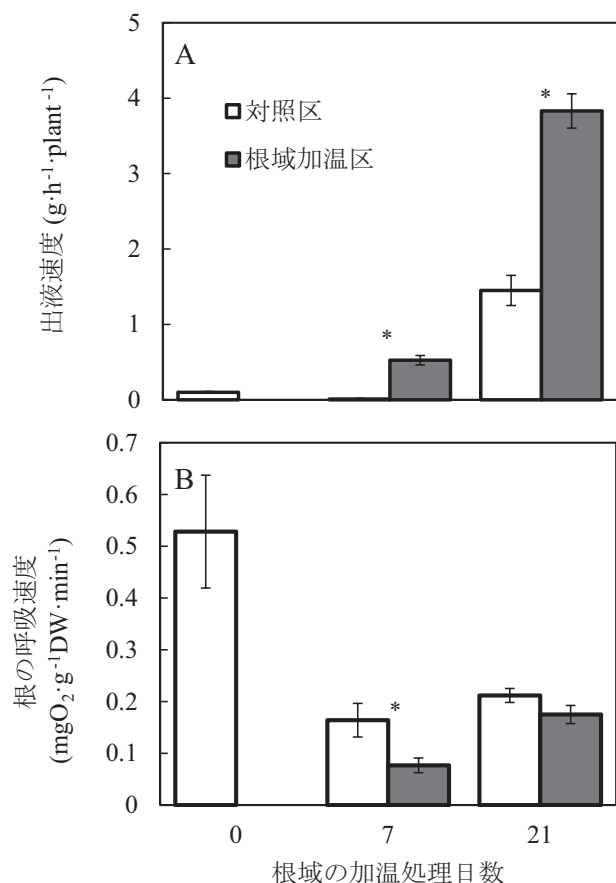


図-7 出液速度 (A) と根の呼吸速度 (B) に及ぼす根域の加温処理と加温処理日数の影響

図中の縦棒線は標準誤差を示す (n = 12)

* : t検定により有意水準 5% で差があることを示す

対照区と根域加温区との間に有意な差が認められなかった。また、対照区では、Ca 以外のすべての元素が、根域加温処理開始 7 日後と 21 日後において、根域加温処理開始 0 日後より有意に低下した。Ca の含量は、根域加温処理開始 7 日後では根域加温処理開始 0 日後より有意に低下したが、根域加温処理開始 21 日後では根域加温処理開始 0 日後と同じ水準に回復した。一方、根域加温区では、すべての元素で対照区より含量の低下の度合いが小さく、Ca の含量は根域加温処理開始 21 日後において根域加温処理開始 0 日後より有意に高くなった。

各部位の養分含量と乾物重を掛け合わせた、1 株当た

りの養分含量は、根域加温処理開始 7 日後では、いずれの養分も根域加温の有無による差は認められなかったが、根域加温処理開始 21 日後では、すべての元素において根域加温区の含量は、対照区のそれらより有意に多かった。

根の内生 IAA 含量は、根域加温処理開始 7 日後と 21 日後ともに、処理区間の有意な差は認められなかった (図-8)。また、対照区と根域加温区ともに、根域加温処理開始 0 日後から 7 日後までは有意な変化は認められず、根域加温処理開始 21 日後では根域加温処理開始 0 日後より有意に減少した。II 章の結果では、夏季の高温期の根域冷却によって、根の内生 IAA 含量と根の RGR に有意な正の相関が認められたが、本実験ではその傾向は認められなかった (図-9)。

3) 根の内部形態に及ぼす根域加温の影響

根の内部形態について、撮影した横断面 (図-10) を解析した結果、根域加温区的全断面積が対照区より大きく増加して、表皮と皮層、中心柱の断面積も増加した (表-3)。一方、全断面積に占める中心柱の断面積の割合や、中心柱の断面積に占める木部の断面積の割合については、対照区との間に有意な差は認められなかった。

4) 果実の収穫量と乾物分配率に及ぼす根域加温の影響

総収量は、根域加温区の方が対照区より有意に多くなった (表-4)。総収量を構成する要素として、収穫果実数は対照区と根域加温区との間に有意な差は認められなかったのに対して、1 果重は根域加温区の方が対照区より有意に大きかった。一方、果汁の屈折計示度は、根域加温区の方が対照区より有意に低かった。栽培終了時の部位別の乾物重は、茎葉においても、果実においても、根域加温区の方が対照区より有意に多かった (表-5)。しかし、茎葉、根および果実の乾物分配率は、対照区と根域加温区との間に有意な差は認められず、地上部と根の乾物重の比 (T/R 比) にも有意な差は認められなかった。

表-2 根と地上部の養分含量に及ぼす根域の加温処理の影響

根域の加温 処理日数	根の含量 (mg · g ⁻¹ DW)					地上部の含量 (mg · g ⁻¹ DW)					1 株当たりの含量 (mg · plant ⁻¹)				
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
0	対照区 68.6 a	7.0 c	17.9 c	8.3 a	8.7 a	51.6 ab	7.6 a	70.0 a	17.6 b	7.0 a	28.9 c	4.2 c	37.7 c	9.6 c	4.0 c
7	対照区 51.2 ab	7.4 b	22.8 c	7.2 ab	5.5 c	42.5 d	4.8 d	55.2 c	13.0 c	4.8 d	43.2 c	5.0 c	53.5 c	13.2 c	5.1 c
	根域加温区 44.2 b	9.9 a	40.9 b	5.6 cd	7.5 abc	48.3 bc	6.7 b	63.3 ab	16.5 b	6.1 b	55.7 c	8.0 c	71.7 c	18.4 c	7.2 c
21	対照区 52.9 ab	9.4 abc	55.3 a	4.8 d	6.4 b	46.5 c	6.0 c	54.3 c	18.8 b	5.4 c	190.3 b	25.5 b	219.4 b	70.7 b	22.3 b
	根域加温区 42.7 b	9.0 ab	50.7 a	6.1 bc	7.6 ab	52.8 a	8.0 a	59.6 bc	25.3 a	7.3 a	301.3 a	47.0 a	340.9 a	137.0 a	42.9 a

同一列内の異なるアルファベット間には Tukey の多重比較により有意水準 5% で差があることを示す (n = 12)

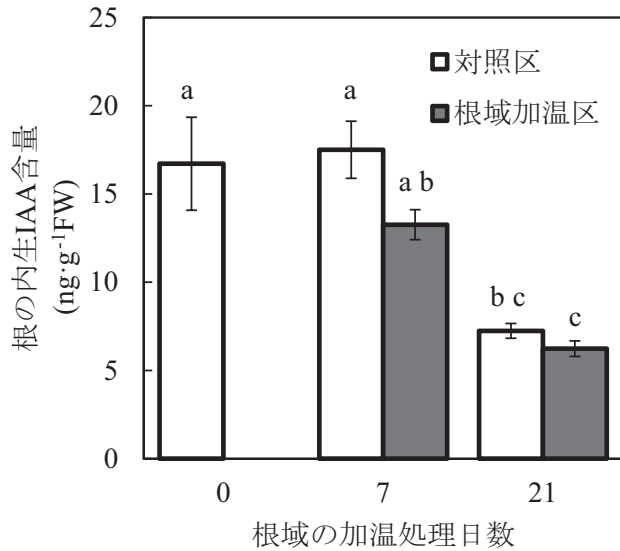


図-8 根の内生 IAA の含量に及ぼす根域の加温処理と加温処理日数の影響

図中縦棒線は標準誤差を示す
異なる文字間には Tukey の多重比較により有意水準 5% で差があることを示す (n = 3)

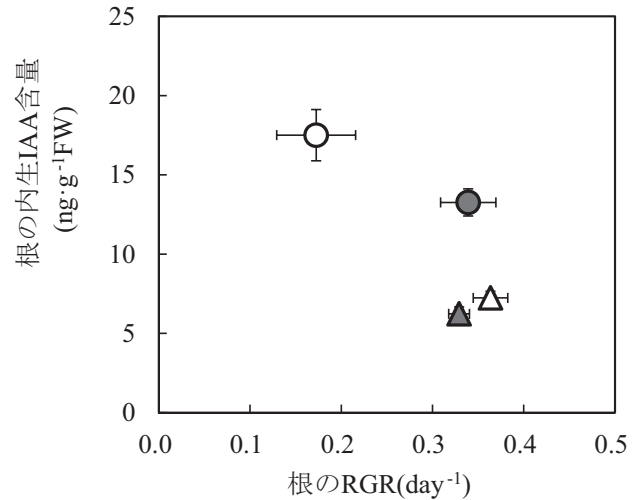


図-9 根の RGR と内生 IAA 含量との相関関係
図中の縦棒線と横棒線は標準誤差を示す

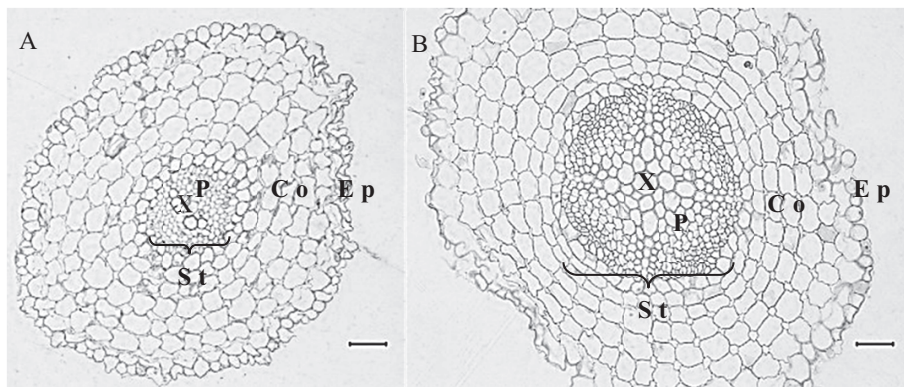


図-10 根の先端部近傍における横断面の顕微鏡画像
A：対照区，B：根域加温区
根域加温処理 21 日後に採取した根の顕微鏡画像を撮影した
Ep：表皮，Co：皮層，St：中心柱，X：木部，P：篩部
スケールバー：50 μm

表-3 根の組織別の断面積に及ぼす根域の加温処理の影響

根域の加温処理日数	全断面積 (10 ³ um ²)	表皮と皮層 (10 ³ um ²)	中心柱 (10 ³ um ²)	中心柱/全断面積 (%)	木部/中心柱 (%)
0 対照区	141.9 b	131.9 b	10.0 b	7.0 a	15.4 a
7 対照区	80.2 b	74.4 b	5.9 b	7.4 a	15.2 a
7 根域加温区	88.3 b	82.7 b	5.6 b	6.4 a	16.8 a
21 対照区	174.1 b	162.5 b	11.6 b	6.7 a	13.0 a
21 根域加温区	411.1 a	372.6 a	38.5 a	9.5 a	20.6 a

同一列内の異なるアルファベット間には，Tukey の多重比較により有意水準 5% で差があることを示す (n = 3)

表-4 果実の収穫量と屈折計示度に及ぼす根域の加温処理の影響

	総収量 (g/株)	収穫果実数 (果/株)	1果重 (g/果)	屈折計示度 (度)
対照区	3444	14.8	230.4	5.9
根域加温区	4139	14.2	291.8	5.6
t 検定	*	NS	*	*

*：有意水準 5% で差があることを示す (n = 24)
NS：有意水準 5% で差がないことを示す

d 考察

トマトに及ぼす低温の影響については，気温 12～18℃の範囲では，低温ほど葉面積が減少し (Hoekら，1993)，着果率が低下することが報告されている (Picken，1984)。また，平均気温 14℃では 18℃や 22℃と比べて

果実の肥大が抑制され (Adamsら，2001)，12℃以下では炭素収支がマイナスとなることが報告されている (Criddleら，1997)。昼の温度を 19℃一定として，夜間の気温を 6～14℃に変化させた場合も，夜間の気温が低いほど葉面積が減少し，生育は抑制されることが

表-5 栽培終了時における部位別の乾物重と乾物分配率に及ぼす根域の加温処理の影響

	茎葉 ^a	乾物重 (g)			乾物分配率 (%)			T/R 比
		根	果実	合計	茎葉	根	果実	
対照区	171.0	15.1	167.4	353.4	48.3	4.4	47.3	23.5
根域加温区	223.2	18.6	214.8	456.6	48.7	4.1	47.2	22.5
t 検定	*	-	*	*	NS	-	NS	NS

a 除去した葉および側枝を含む

-: 根が相互にからまったため、平均値のみで反復なしとした

*: 有意水準 5% で有意差があることを示す (n = 24)

NS: 有意水準 5% で有意差なしを示す

知られている (Smeets・Garretsen, 1986). 根域温度は気温によって最適温度が変化するものの (Gosselin・Trudel, 1983a), 概ね 20 ~ 30℃ が最適であるとされ (Gosselin・Trudel, 1984; Hurewitz・Janes, 1983; 宍戸・熊倉, 1994; Tindall ら, 1990), それより低い根域温度では生育は抑制される. 25℃ 前後の好適な気温における実験であるが, 特に 10℃ 以下の根域温度では, 15℃ 程度と比べて著しい生育抑制が起こることが報告されている (Hurewitz・Janes, 1983; 宍戸・熊倉, 1994). これらの報告と照らし合わせると, 本実験における室温は, 重大な低温障害が起こるほどではないが, 種々の生理的現象に大きな影響を及ぼすには十分であったものと推察された. また, 根域温度についても, 対照区では著しい低温障害までは起こらないが, 最低温度付近では低温によって生育抑制を受ける程度に低いものと考えられた. それに対して, 根域加温区は生育抑制が起こりうる根域温度より高い温度で推移していた.

根域加温による根の生育に関しては, 25℃ 前後の好適な気温での根域加温によって根の生育が促進されるという報告がある (Bugbee・White, 1984; Tindall ら, 1990). しかし, 報告と同様に根の生育促進が冬季の低温期の根域加温でも起こるかどうかは, 有力な知見がなかったため, 本実験の結果によって, 同様の現象が起こることが確認された. また, 地上部では, 根より遅れて生育の促進が認められた. したがって, 根域加温によって, まず初めに根の生育が促進され, それが地上部に影響を及ぼしたものと推察された. 根域加温が及ぼす地上部の影響については, 葉面積の増加や (Hurewitz・Janes, 1983), 蒸散速度の上昇が報告されており (宍戸・熊倉, 1994), 本実験の結果との関連性が示唆された.

根の生育が促進された要因として, 根の生理活性, 養分吸収および植物成長調節物質との関連性が示唆されている. 根の生理活性について, 出液速度は 1 株当たりの根の生理活性の指標として用いられ (山口ら,

1995), 水と養分の吸収量に影響を及ぼすと言われている (Klock ら, 1997). 本実験の結果では, 対照区と根域加温区との出液速度の変化は, 根の生育や養分含量の変化と傾向が一致しており, Klock ら (1997) の知見はこの結果を支持するものとなった. これに対して, 根の呼吸速度は, 根域加温処理開始から大きく低下した. この現象の主な原因としては, NFT 水耕ベッドへの移植と根域加温処理を同時に行ったので, 移植に伴うストレス (植え痛み) の影響が大きかったものと推察された. 根の呼吸速度と根域温度との関係については, 低温ほど呼吸速度は低下することが報告されている (宍戸・熊倉, 1994). この報告における根の呼吸速度の測定条件は, 栽培時の温度環境と同一な温度条件下での測定であり, 25℃ 一定とした本実験とは条件が異なる. したがって, 実際の温度条件においては, 低温ほど呼吸速度は低下するが, 同一温度で測定した場合は, 根の呼吸速度は, 生育時の根域温度が低くても低下しない可能性が示唆された.

養分含量の変化について, 地上部は根域加温区でいずれの元素も含量が増加した. また, 1 株当たりの含量も増加した. 特に地上部の養分含量は, 根域加温の開始後, 速やかに上昇したことから, 根域加温区における養分の地上部への輸送能力が向上していたものと推察された. また, N や P を中心とした地上部の養分含量の増加によって, 根域加温処理開始 21 日後における地上部の乾物重の増加に影響を及ぼしたと考えられた. 同時に, 養分吸収と地上部への輸送の促進には, 出液速度の影響も大きいものと推察された. 根域温度が地上部の養分含量に及ぼす影響について, 低温では P, K, Mg, Ca の吸収が抑制されると報告されており (Gosselin・Trudel, 1983b; Kabu・Toop, 1970), 本実験の結果と一致する. 加えて, II 章における, 夏季の高温期における根域冷却の実験でも, 同様の結果が得られている.

根の生育と関連性が深いと考えられた, 根の内生 IAA について, IAA は側根の発達や伸長を促進することがシロイヌナズナを用いた研究で報告されている (Novickienė ら, 2010; Ohashi-Ito ら, 2013; Pitts ら, 1998; Wilson ら, 1990). II 章では, 夏季の高温期における根域冷却によって, 根の内生 IAA 含量と根の RGR との間には正の相関が認められたが, 冬季の低温期における根域加温を行った本実験では相関が認められず, 冬季の低温期における根域加温によるオーキシンの, 根の生育に及ぼす影響は, 夏季の高温期における根域冷却と場合と異なり, 小さい可能性が示された.

根の内部形態に関して、根域温度と根の形態形成に関する報告は見当たらない。本実験では、根域加温によって各組織の断面積は増加して、根の断面積全体に占める各組織の断面積の割合には変化が認められなかった。冬季の低温期における根域加温によって、根の肥大が全体的に促進されたことが示された。この中で、特に木部の発達が出液速度や養分の地上部への輸送に寄与したと考えられる。II章における夏季の高温期における根域冷却では、根の木部特異的な肥大が観察され、本実験とは肥大特性が異なった。これは、根の内生 IAA 含量の変化が夏季の高温期における根域冷却と冬季の低温期における根域加温で異なったためではないかと考えられた。オーキシンが根の木部発達に作用することは、シロイヌナズナを用いた研究で明らかになっている (Deng ら, 2012; Ohasi-Ito ら, 2013)。すなわち、夏季の高温期における根域冷却では、根の内生 IAA 含量が増加して、木部の特異的な発達が認められたのに対して、冬季の低温期における根域加温では、根の内生 IAA 含量が増加せず、木部の特異的な発達は起こらなかったものと考えられた。

冬季の低温期における根域加温による果実の収穫量は、Jones ら (1978) によって増加する可能性が示唆されており、本実験の結果によってその説が確認された。一方、根域温度が果実の収穫量に与える影響は、最低夜温が 12℃ 以上の場合には比較的小さいという報告もある (Gosselin・Trudel, 1983a)。本実験と Jones ら (1978) の実験における気温の条件は、Gosselin・Trudel (1983a) の気温の条件と比べて非常に低く、これらの主張の違いは気温の条件の違いによるものであると考えられた。したがって、気温がトマトの生育に影響を及ぼすほどに低い条件では、根域加温は果実の収穫量の増加に寄与する可能性が示された。

栽培終了時における、部位別の乾物分配率については、いずれの部位でも根域加温の有無による変化は認められなかった。すなわち、冬季の低温期における根域加温は植物全体を均一に生育促進させることが示された。根域加温による乾物分配率の変化は、生育初期のトマトで報告があり、根への乾物分配率が減少するという説と (Bugbee・White, 1984)、増加するという説があつて (宍戸・熊倉, 1994)、一致しない。また、これらの報告は、25℃ 程度の好適な気温で行った試験であり、冬季の低温期に行った本実験とは条件が異なる。本実験では、根域加温処理の初期段階において、根の乾物重の増加が地上部より早い段階で起こった点から、後者の説と一致する。

しかし、最終的な乾物分配率には変化が認められなかった。どちらの説とも異なっている。つまり、乾物分配率については、気温や生育ステージによって変化する可能性が考えられ、さらなる知見の集積が必要であると推察された。

以上のことから、冬季の低温期におけるトマトの根域加温は、まず初めに根の生育促進が起こり、出液速度の増加や、木部を含む根の肥大を介した N や P などの養分の吸収と地上部への移動が促進されて、地上部の生育促進につながることを示された。また、果実の収穫量も増加し、冬季の低温期における根域加温の有効性が確認された。

IV 夏季の高温期における茎頂部の局所的な冷却が着果と果実の収穫量に及ぼす影響

a 緒言

夏季の高温期におけるトマトの施設生産では、高温によって花粉稔性が低下する (Sato ら, 2000, 2006)。そのために、花粉稔性の低下に起因する着果不良が (Sato ら, 2002; Picken, 1984)、果実の収穫量を減少させる主な原因の一つとなっている。とくに、開花 10 日前頃に、日平均気温が約 25℃ 以上の高温に遭遇すると、花粉稔性が低下して、着果が不良となる (Iwahori, 1965; Sato ら, 2002)。花粉稔性が低下したときの着果促進処理として、オーキシンやジベレリンを含む薬剤を花房へ噴霧する方法が利用されているが、それでも、高温障害が現れて着果率が低下する (Sasaki ら, 2005)。高温障害を緩和する技術としては、遮光のほかに、ヒートポンプを用いた冷房が有効である。トマトの花粉稔性は、1 日の平均気温の影響を強く受け、1 日の温度較差の影響は小さいことが知られている (Peet ら, 1997)。したがって、日射がなく冷房負荷の小さい夜間に冷房を行って 1 日の平均気温を低下させることで、花粉稔性の改善と着果率の向上が期待される (Willits・Peet, 1998)。しかし、それでもランニングコストが高くなることから、実際の夏季のトマトの生産ではヒートポンプを用いた冷房は普及が進んでいない。

高温による花粉稔性の低下は、花房そのものの温度の影響を受けていると考えられるので、トマトの花房付近のみを局所的に冷却することができれば、施設全体を冷却する慣行の冷房方法に比べて、ランニングコストを抑えられることが期待される。そこで、本章では、トマトの茎頂部を冷却し、群落下部の冷却を抑えることで、着果率を高めて果実の収穫量に及ぼす冷房の効果を維持し

つつ、ランニングコストを少なくすることができるかどうかを調べることにした。そこで、まず初めに、茎頂部の局所的な冷却（以下、局所冷却とする）による温度の変化を調べ、次いで着果率と果実の収穫量に及ぼす影響について検討することとした。

b 材料および方法

1) 栽培概要

材料には、トマトの‘桃太郎ヨーク’（タキイ種苗（株））と‘ビットリオ’（朝日工業（株））を供試した。2010年6月2日に、閉鎖型苗生産システム（商品名「苗テラス」, MKV ドリーム（株））内で72穴セルトレイ（29cm × 59cm）に播種し、昼/夜温を23/17°C、16時間日長条件下で4週間育苗した。その後、ロックウールキューブ（縦7.5cm × 横7.5cm × 高さ6.5cm）に移植して、二次育苗を行い、7月12日に、農業用ポリオレフィンフィルムで被覆した温室内のロックウールスラブ（Master型, Grodan, Co., Ltd.）に株間22.5cm、畝間2.1mで192株を定植した。培養液は、大塚A処方液（大塚アグリテクノ（株））を用いて、 $EC_{0.8dS} \cdot m^{-1}$ のかけ流し式で供給した。定植後、1週間ごとに培養液のECを $0.1dS \cdot m^{-1}$ ずつ上昇させるとともに、8月9日以降は $1.2dS \cdot m^{-1}$ で管理した。誘引は3.0mの高さで行い、つる下ろし栽培を行った。着果の促進を目的として、3つの花が開花した花房に、順次0.15%の4-クロロフェノキシ酢酸（商品名「トマトーン」, 日産化学工業（株））の100倍液を噴霧した。栽培中の摘心は実施せずに、10月15日に栽培を打ち切った。

2) 局所冷却の方法

茎頂部の局所冷却は、定植直後の7月12日から栽培打ち切り日直前の10月1日まで行った。局所冷却には、冷房能力20kWのヒートポンプ（SFYP224A型, ダイキン工業（株））を使用した。冷房負荷が小さく、電気料金が比較的安価な夜間電力を利用することとして、ヒートポンプの運転は午前0～6時に行った。また、その時間帯は温室の天面に保温カーテン（SLS50型, 誠和（株））を展張した。ヒートポンプに折り径40cmのポリエチレン製ダクトを接続し、群落上の高さ3mの位置にダクトを吊り下げた。ダクトには直径1cmの穴を開けて、冷風が茎頂部に直接当たるようにした。ヒートポンプの設定温度は24°Cとして、ヒートポンプの制御用の温度センサーは、温室中央部の冷風が当たる位置に設置した。別の温室内において、同様の作型でトマトを栽培し、局所冷却を行わない対照区を設けた。対照区にもダクトを同様に設置して、夜間に常温で送風した。

3) 室温と植物体表面温度の測定方法

対照区と、茎頂部の局所冷却を行った処理区（以下、局所冷却区と表す）の群落中央部において、地面からの高さ別に3か所（1.0m, 2.0m および 3.0m）に温度センサー（RTH-3010型, エスペックミック（株））を設置して、室温を1秒間隔で測定した。室温のデータは10分ごとの平均値として、温度ロガー（RT-31S型, エスペックミック（株））に記録した。

植物体の表面温度の測定には熱画像測定装置（TH9100型, NEC三栄（株））を用い、群落の中央部付近の植物体の表面温度を5分間隔で測定した。測定は、夜間の局所冷却の時間帯（午前0～6時）と、局所冷却を終了して室温が対照区と同程度になるまでの時間（午前6～7時）に行った。得られた熱画像から、茎頂部と、地面から約50cmの高さの下位葉を、局所冷却区、対照区とも3点ずつ抽出して、時間の経過による表面温度の変化を測定した。

4) 花芽分化と開花に関連した形質の調査方法

花芽分化と開花に関連する形質として、花粉稔性、着果率、花房間の開花間隔および果実の成熟日数を調査した。花粉稔性は、Fernández-Muñozら（1994）の方法に準じて次のように算出した。すなわち、開花したトマトの花から、ピンセットを用いて葯を採取した。採取した葯をアセトカルミン溶液に浸漬して、葯の中の花粉を十分に染色した。その後、十分に水洗して、葯をスライドガラス上で押し潰し、葯の中の花粉粒を放出させて、光学顕微鏡で花粉粒の写真を撮影した。写真中のすべての花粉粒に占める、染色された花粉粒の割合を求めて、花粉稔性率（%）として表した。花粉稔性率の測定には‘桃太郎ヨーク’のみを供試し、7月21日～9月29日まで、1週間に1回ずつ調査した。調査は3反復行った。

1株当たりの開花数と着果数を測定して、開花数に占める着果数の割合（%）を着果率として表した。花芽分化の速度を明らかにするために、各花房の第1番花の開花日を調査した。すなわち、ある花房の第1番花の開花日から、次の花房の第1番花の開花日までの日数を算出して、花房間の開花間隔として表した。花や果実の摘除は行わず、花房間の開花間隔と着果率の調査は1処理区当たり8反復行った。各果房の第1番果は収穫日を記録し、開花日から収穫日までの日数を算出して、平均値を成熟日数として表した。

花粉稔性、着果率、花房間の開花間隔および成熟日数は、第3花（果）房以降を用いて調査した。すなわち、第1花（果）房と第2花（果）房は、局所冷却処理を開

始する前に花芽分化が完了していたと考えられ、局所冷却の影響が小さいと判断されたので、調査の対象から除外した。

5) 果実の収穫量の調査方法

前述の理由から、第3果房以降の果実について収穫量を調査した。赤く熟した果実を収穫し、その合計重量を総収量として表した。収穫した果実の中で、果実重が50g以上の正常果を可販果として、その合計重量を可販果収量として表した。総収量に占める可販果収量の割合を可販果率とし、総収量を全収穫果数で除した値を1果重として表した。調査は4反復行った。

c 結果

1) 室温と植物体の表面温度に及ぼす局所冷却の影響

実験を行った2010年の夏季は記録的な猛暑となった。このため、実験を行った温室内の気温(室温)は平年と比べて高く、局所冷却を行った実験期間中の対照区における、地面からの高さ2mの位置の室温は、1日平均で30.4℃であった(図-11)。対照区と局所冷却区の室温の推移を比較すると、日中は処理区間で大きな違いは認められず、30℃を大きく超えて40℃近くに達するなど、非常に高くなった。また、対照区、局所冷却区とも、地面から高い位置ほど室温が高くなる傾向が認められた。夜間の室温は、ヒートポンプを運転していない午前0時までは、対照区と局所冷却区との間に違いは認められず、地面からの高さによる室温の変化もほとんど認められなかった。ヒートポンプを運転した午前0～6時までは、対照区では室温が26～28℃程度で推移し、地上からの高さによる温度の違いは認められなかった。これに対して、局所冷却区では対照区と比べて、時間経過による室

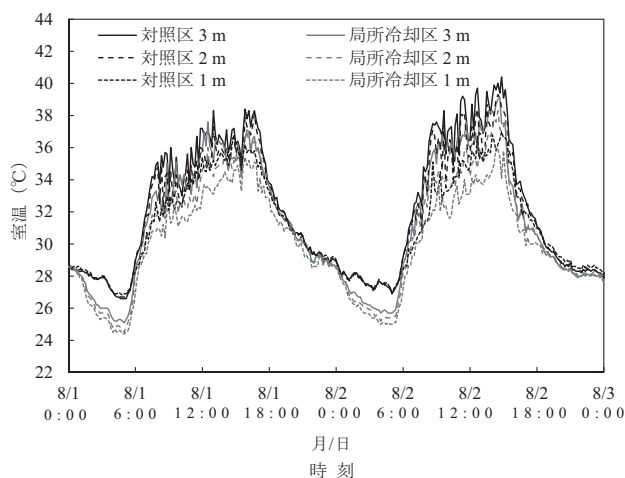


図-11 施設内の地面からの高さ別の室温に及ぼす茎頂部の局所冷却の影響

温の低下が顕著で、室温は24℃程度まで低下し、対照区とはおよそ2℃の温度差となった。

夜間の植物体の表面温度は、対照区では地面からの高さによる温度の変化は小さく、茎頂部、下位葉とも26～27℃で推移した(図-12, 図-13)。一方、局所冷却区では、地面からの高さによる温度の変化が顕著であった。すなわち、茎頂部の表面温度は局所冷却によって25℃程度となり、対照区の26～27℃より低かったのに対して、下位葉の表面温度は27℃前後となり、対照区と同程度となった。

2) 花芽分化と開花に関連した形質に及ぼす局所冷却の影響

花芽分化と開花に関連した形質として、花粉稔性率、着果率、花房間の開花間隔および成熟日数を調査した。その結果、花粉稔性率は、対照区、局所冷却区とも、調査した7月21日～9月29日の間のほとんどの日において50%未満であった(図-14)。特に8月9日と9月1日には、対照区、局所加温区とも0%であった。調査日ごとに対照区と局所冷却区を比較すると、9月29日以外のすべての調査日で、局所冷却区の花粉稔性率は対照区の花粉稔性率より高く、いくつかの調査日では、有意な差が認められた。また、調査した期間(7月21日～9月29日)の平均値で比較すると、対照区の花粉稔性率は12.8%、局所冷却区の花粉稔性率は21.1%で、局所冷却区の方が対照区より有意に($p < 0.05$)高かった。

開花数、着果数、着果率、花房間の開花間隔および成熟日数は、'桃太郎ヨーク'においても、'ピットリオ'においても、局所冷却の有無による有意な差は認められなかった(表-6)。品種間で比較すると、局所冷却区

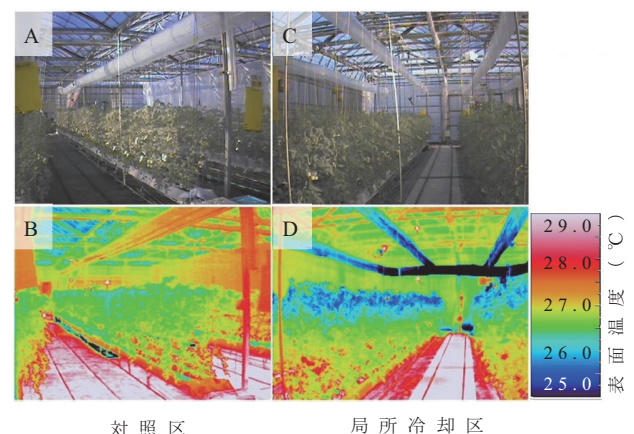


図-12 対照区(左)と局所冷却区(右)における夜間の植物体の表面温度分布

AとCは可視画像、BとDは熱画像を示す
対照区の熱画像は2010年8月3日の午前2時に撮影した
局所冷却区の熱画像は8月2日の午前2時に撮影した

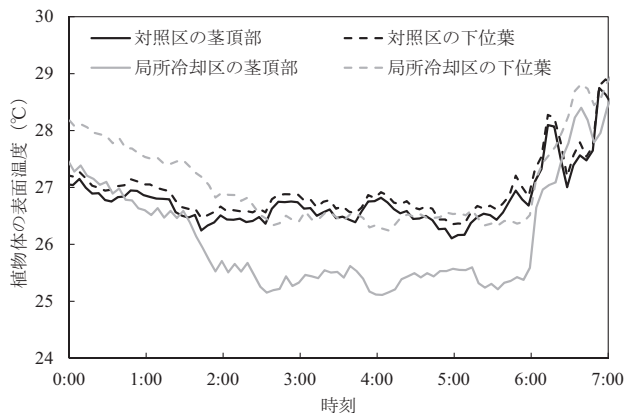


図-13 植物体の表面温度の時間変化に及ぼす局所冷却の影響

対照区は2010年8月3日、局所冷却区は8月2日に測定した

において‘桃太郎ヨーク’の花房間の開花間隔が‘ビットリオ’より有意に短かったが、それ以外の形質には有意な差が認められなかった。

3) 果実の収穫量に及ぼす局所冷却の影響

栽培打ち切り直前に収穫期に至った果房は、‘桃太郎ヨーク’で第6～9果房、‘ビットリオ’で第5～7果房であった。総収量は‘桃太郎ヨーク’において、局所冷却区の方が対照区よりも有意に多かった(表-7)。同様に、‘ビットリオ’においても、局所冷却区の方が対照区よりも有意に多かった。局所冷却区における総収量の対照区に対する増加割合は、‘桃太郎ヨーク’で37%、‘ビットリオ’で34%であった。また、対照区においては品種間で有意な差が認められなかったが、局所冷却区においては‘桃太郎ヨーク’の方が‘ビットリオ’より多かった。収穫果実数について比較すると、‘桃太郎ヨーク’では局所冷却区の方が対照区より多くなったが、‘ビットリオ’では対照区と局所冷却区との間に有意な差は認められなかった。また、対照区、局所冷却区ともに、‘桃太郎ヨーク’の方が‘ビットリオ’より多かった。1果重について比較すると、‘桃太郎ヨーク’では対照区と局所冷却区との間に有意な差は認められなかったが、‘ビットリオ’では局所冷却区の方が対照区より大きかった。局所冷却区における1果重の対照区に対する増加割合は、‘桃太郎ヨーク’で8%、‘ビットリオ’で11%であった。また、対照区においても、局所冷却区においても、‘ビットリオ’の方が‘桃太郎ヨーク’より大きかった。可販果収量についても、総収量と同様の傾向が認められ、‘桃太郎ヨーク’において、局所冷却区の方が対照区よりも有意に多かった。同様に、‘ビットリオ’においても、局所冷却区の方が対照区よりも有意に多かった。局所冷却区における可販果収量の対照区に対する増加割合

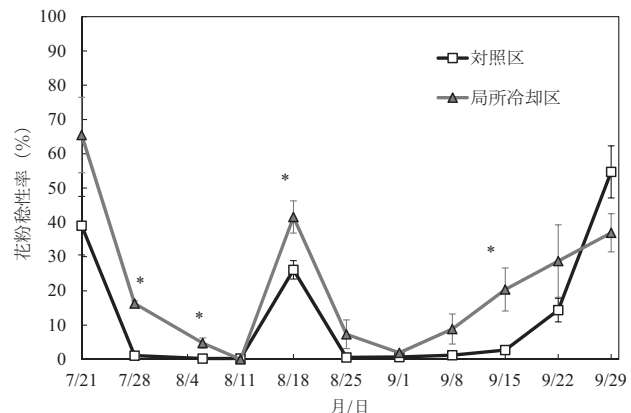


図-14 花粉稔性率の日変化に及ぼす局所冷却の影響

* : t検定により有意水準5%で差があることを示す (n = 3) 検定にはアークサイン変換による値を用いた

は、‘桃太郎ヨーク’で40%、‘ビットリオ’で32%であった。また、対照区においては‘桃太郎ヨーク’の方が‘ビットリオ’より多かったが、局所冷却区では品種間で有意な差は認められなかった。可販果率については、‘桃太郎ヨーク’においても、‘ビットリオ’においても、局所冷却の有無による可販果率の有意な差は認められなかった。品種間で比較すると、対照区においては‘ビットリオ’の方が‘桃太郎ヨーク’より高くなったが、局所冷却区では品種間で有意な差は認められなかった。

d 考察

トマトの生育適温は、光環境や品種によって多少の違いはあるが、概ね13～25℃とされる(Charles・Harris, 1972; Osborne・Went, 1953; Satoら, 2000)。また、1日の温度較差が着果や果実の肥大に及ぼす影響は小さく、1日平均の温度の影響が大きいことが知られている(Peetら, 1997)。このような観点で本章で行った実験結果を見ると、対照区においては実験期間中の日平均室温が30℃を超えており、花粉稔性の低下や果実肥大の抑制が認められたことから、高温による障害が発生していたとみられた。一方、局所冷却区では、日中の室温にほとんど違いがなかったものの、夜間の室温は対照区より2℃程度低かったため、高温障害を完全には回避できなかったものの、高温による影響を多少は回避できたものと考えられた。その理由として、夜間の植物体の表面温度は、対照区において、茎頂部から下位葉までほぼ均一であったのに対して、局所冷却区では、下位葉の表面温度は対照区と同程度であったものの、茎頂部の表面温度が顕著に低下していたことが挙げられる。したがって、ダクトをトマトの群落の上部に吊り下げて、冷風を茎頂部に吹き出させる本章の方法で、トマトの茎頂部の局所的な冷却が可能であることが示され

表－6 花芽分化と着果に関連した形質に及ぼす局所冷却の影響

品種	処理区	開花数 (花/花房)	着果数 (果/花房)	着果率 ^a (%)	花房間の開花間隔 (日/花房)	成熟日数 (H)
桃太郎ヨーク	対照区	7.6A	2.8AB	38.7A	7.6AB	42.4A
	局所冷却区	7.2A	3.1A	45.4A	7.0B	41.2A
ビットリオ	対照区	6.4A	2.2B	34.9A	8.5A	41.2A
	局所冷却区	6.1A	2.4AB	39.0A	8.5A	39.8A

a 検定にはアークサイン変換した値を用いた
同一列内で異なるアルファベット間には Tukey の多重比較により有意水準 5% で差があることを示す (n = 8)

表－7 果実の収穫量に及ぼす局所冷却の影響

品種	処理区	総収量 (g/株)	収穫果実数 (果/株)	1果重 (g/果)	可販果収量 (g/株)	可販果率 ^a (%)
桃太郎ヨーク	対照区	1585BC	13.5B	118C	1448B	91.3B
	局所冷却区	2167A	17.0A	128C	2021A	93.2B
ビットリオ	対照区	1330C	8.8C	150B	1289C	96.9A
	局所冷却区	1783B	10.8C	166A	1703AB	95.4AB

a 検定にはアークサイン変換した値を用いた
同一列内で異なるアルファベット間には Tukey の多重比較により有意水準 5% で差があることを示す (n = 4)

た.

園芸作物の局所的な冷却に関する研究は、根域の冷却に関する事例が多く(藤井ら, 1962; 藤重ら, 1991; 堀ら, 1968; Lingle・Davis, 1959; Nkansah・Ito, 1995a; 佐々木・板木, 1989; Shishido・Hori, 1979), 根域以外の部位の局所的な冷却については、近年になって開発された、イチゴのクラウン部の冷却技術以外は報告がない(壇ら, 2005; 佐藤・北島, 2010; 曾根ら, 2007). そのため、本章において、トマトの茎頂部の表面温度を局所的に冷却できたという知見は極めて重要であり、今後の局所温度制御に関する研究の進展に寄与するものであると考えられた。

花粉稔性の低下は代表的な高温障害の1つであり、開花10日前頃の高温の影響を強く受けることが明らかにされている(Satoら, 2002). その原因として、葯の中の花粉の周辺に存在し、養分の供給など、花粉の発達に重要な役割を担うタペート細胞に異常が起こり(Iwahori, 1965; Suzukiら, 2001), 花粉の発達が阻害されるためであると考えられている。そのため、花粉稔性は高温ストレスの程度を評価する指標として利用されている(El Ahmadi・Stevens, 1979; Satoら, 2002). このような指標を用いて、本章の結果を見ると、局所冷却区の方が対照区よりも花粉稔性率が高かったことから、局所冷却区は、対照区と比べて高温ストレスが緩和されている可能性が示唆された。

花粉稔性は種子の形成に大きく影響を及ぼすことが知られている(Fernández-Muñozら, 1994). 種子の形成はオーキシン合成に重要な役割を持ち、子房内のオー

キシンの濃度を増加させることを通して子房を肥大させ、着果させる(Borner・Bangarth, 1988; Lund, 1956). そのため、一般的には花粉稔性と着果率との間に高い正の相関が認められる(Fernández-Muñozら, 1994). 一方、本章では局所冷却区において対照区と比較して花粉稔性率が有意に増加したものの、着果率の向上は、‘桃太郎ヨーク’でも、‘ビットリオ’でも、認められなかった。これは、外生オーキシン(トマトトーン)を施用したことで単為結果が誘導されたためであると考えられたので、本章における着果は、花粉稔性に依存していなかった可能性を示唆している。

夏季の施設栽培におけるトマトの果実生産について、夜間に冷房を行い、施設全体を20℃以下に保つと、冷房をしない場合と比較して総収量が増加し、果実品質も向上することが報告されている(Willits・Peet, 1998). 本章では、夜間に茎頂部のみを局所的に冷却しており、夜間の室温も最も低い測定箇所でも24℃と、既報の温度条件とは異なるが(Willits・Peet, 1998), 既報と同様に総収量の増加が認められたので、茎頂部の局所的な冷却が果実の収穫量の増加に繋がる可能性が示されたといえる。

以上のことから、夏季高温期のトマトの施設栽培における夜間の茎頂部の局所冷却は、茎頂部の夜間の表面温度の低下によって花粉稔性の低下をある程度抑えられることが確認され、高温ストレスの緩和に有効であることが示された。また、茎頂部を局所冷却すると、局所冷却をしない場合と比べて、収穫果実数や1果重が増加し、総収量や可販果収量も増加した。一方、局所冷却にかか

る経費や、施設全体を冷却する場合のコストの比較が不十分であり、今後の検討が必要な課題であると考えられた。

V 冬季の低温期における茎頂部の局所的な加温が着果と果実の収穫量および燃料消費量に及ぼす影響

1 茎頂部の局所的な加温の強さが果実の収穫量に及ぼす影響

a 緒言

冬季の低温期における局所的な加温（以下、局所加温と表す）に関する研究としては、トマトの根域や（Gosselin・Trudel, 1983a, b; Jones ら, 1978; 中野ら, 2008a）、イチゴのクラウン部のような（佐藤・北島, 2010; 曾根ら, 2007）、地下部もしくは地面付近を集中的に加温した例が多い。一方、無限伸長型のトマトのような茎伸長性の大きい果菜類において、茎頂部や開花房を局所加温して、生育や果実の収穫量を調べた事例は極めて少ない（森山ら, 1999）。そこで本章では、暖房費の削減につながるトマトの茎頂部と開花房付近（以下、茎頂部と表す）の局所加温が有効かどうかを検討することを目的として、第1節として、冬季の低温期における茎頂部の局所加温が植物体表面温度や花芽分化と開花に関連する形質と果実の収穫量に及ぼす影響を調べることにした。

b 材料および方法

1) 栽培概要

材料には、トマトの‘麗容’（サカタのタネ（株））と‘桃太郎はるか’（タキイ種苗（株））を供試した。2007年9月21日に播種し、IV章と同様の方法で4週間育苗した。その後、ロックウールキューブ（縦7.5cm×横7.5cm×高さ6.5cm）に移植して二次育苗を行い、10月30日に愛知県知多郡武豊町の床面積200m²のガラス温室内でロックウールスラブ（Master型, Grodan, Co., Ltd.）に10a当たり約2,000株の栽植密度で、198株定植した。培養液は大塚A処方液（大塚アグリテクノ（株））を用いて、EC1.0dS・m⁻¹のかけ流し式で供給した。定植後、1週間ごとに培養液のECを0.1dS・m⁻¹ずつ上昇させるとともに、12月11日以降はEC1.6dS・m⁻¹で管理した。誘引は1.7mの高さで行い、つる下ろし栽培を行った。着果はマルハナバチによる受粉を想定して、中山（2007）の方法によるブローを用いた送風受粉を行った。

2) 局所加温の方法

2007年11月12日～2008年1月7日の間は、最低温度を13℃に設定してガラス温室内全体を加温した。この加温には灯油温風暖房機（KA-120型、ネボン（株））を用い、ポリダクトを温室内通路に配置する方法で行った。暖房機の制御用の温度センサーは、局所加温の影響を受けないようにガラス温室中央部の1.5mの高さに設置した。また、12～2月の間は農業用ポリ塩化ビニル製の内張りフィルムを固定張りした。1月8日から温室内全体の加温の設定温度を、トマト生産における夜間温度の低温限界と考えられている8℃（田中・安井, 1986）に下げると同時に、茎頂部の局所加温処理を開始した。局所加温処理には小型の電気温風機（SF1008A型、総和産業（株））を用い、温風機に接続したポリダクトに穴を開けて、温風がトマトの茎頂部に直接当たるように設置した（図-15）。各品種、それぞれ3処理区ずつ設け、局所加温の弱加温区（室温15℃で加温開始、出力500W）、局所加温の強加温区（室温20℃で加温開始、出力1kW）、および局所加温を行わない対照区を設け、4月30日まで局所加温処理を行った。1区当たり4株ずつ供試し、4反復行った。

3) 室温と植物体の表面温度の測定方法

各処理区の茎頂部と同じ高さ（約1.5m）の室温をロガー付き温度センサー（3670型、日置電機（株））を用いて1秒間隔で測定し、10分ごとの平均値として記録した。同時に、夜間の植物体全体の表面温度を熱画像測定装置（TH9100型、NEC三栄（株））で測定した。得

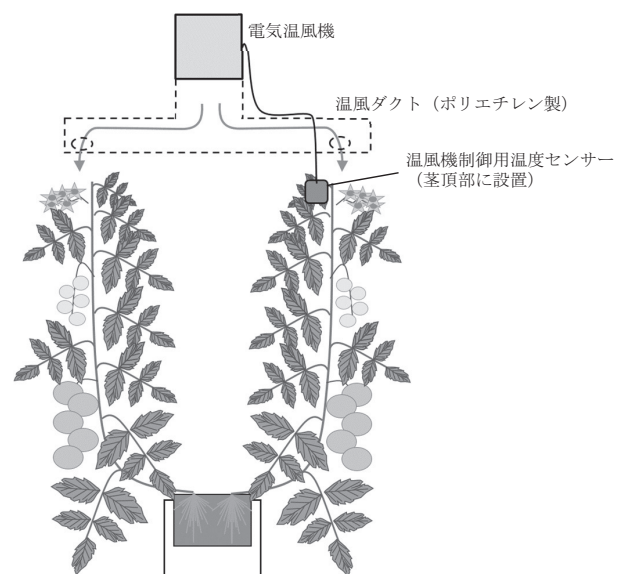


図-15 電気温風機による茎頂部の局所加温の方法
植物体直上にある温風ダクトに直径2cm程度の穴を開け温風を茎頂部に当てた温風の流れを赤矢印で示した。

られた熱画像から、茎頂部と、地面から約50cmの高さの下位葉を、対照区、局所加温の弱加温区、および局所加温の強加温区それぞれについて2点ずつ抽出して、時間の経過による表面温度の変化を測定した。

4) 花芽分化と開花に関連した形質の調査方法

花芽分化と開花に関連した形質として、花粉稔性、着果率および花房間の開花間隔を調査した。花粉稔性は、IV章に準じて測定し、花粉稔性率として表した。着果率は、果(花)房ごとの着果数を開花数で除した値に100倍して算出した。ただし、1果房当たりの着果数が6果以上であった場合は、6果に摘果して、その果房の着果率は、開花数に関係なく100%として表した。花房間の開花間隔は、IV章と同様の方法で測定した。以上の調査は、局所加温処理を開始した1月8日以降に開花した花のみを対象にして行った。局所加温処理開始時に、'麗容'では第6花房、'桃太郎はるか'では第7花房が開花していた。

5) 果実の収穫量の調査方法

果実の収穫量は、局所加温処理を開始した1月8日以降に開花した花が肥大した果実について調査した。赤く熟した果実を収穫し、その合計重量を総収量として表した。収穫した果実の中で、果実重が50g以上の正常果を可販果として、その合計重量を可販果収量として表した。総収量に占める可販果収量の割合を可販果率とし、総収量を全収穫果数で除した値を1果重として表した。収穫は3月24日～5月30日に行った。調査は4反復行った。

c 結果

1) 室温と植物体の表面温度に及ぼす局所加温の強さの影響

局所加温の処理期間中における日中の最高室温は、概ね25℃前後で推移したが、雨天時は15℃程度となり、晴天時には32℃を超える場合もあった(データ略)。2月27～28日における夜間(午後7時～午前7時)の茎頂部の最低温度は、対照区、局所加温の弱加温区、局所加温の強加温区が、それぞれ8.1℃、8.7℃、9.0℃であった(図-16)。

2月27日の夕方から28日の早朝にかけて、熱画像測定装置によって植物体の表面温度を測定した結果、茎頂部の表面温度は、日没までは各処理区ともほぼ同一の表面温度であったが、日没後に局所加温を開始するとともに処理区間で表面温度に差が生じて、局所加温の強加温区が最も高く、次いで局所加温の弱加温区、対照区の順となった(図-17)。また、全体的に室温が低下した後夜半では、局所加温の弱加温区と局所加温の強加温区と

の表面温度の差は小さかった。夜間の表面温度の平均は、対照区で9.6℃、局所加温の弱加温区で11.5℃、局所加温の強加温区で13.0℃であった。下位葉の表面温度は、対照区においては茎頂部と同程度であったが、局所加温の弱加温区と局所加温の強加温区においては茎頂部より低かった。また、時間帯に関わらず処理区間に明確な違いは認められず、夜間の表面温度の平均は対照区で9.9℃、局所加温の弱加温区で10.0℃、局所加温の強加温区で10.3℃であった。

2) 花芽分化と開花に関連した形質に及ぼす局所加温の強さの影響

花芽分化と開花に関連した形質として、花粉稔性率、着果率、花房間の開花間隔および成熟日数を調査した。その結果、花粉稔性率は、'麗容'では、1月23日において、局所加温の弱加温区と強加温区の方が対照区より高かったが、局所加温の弱加温区と局所加温の強加温区との間

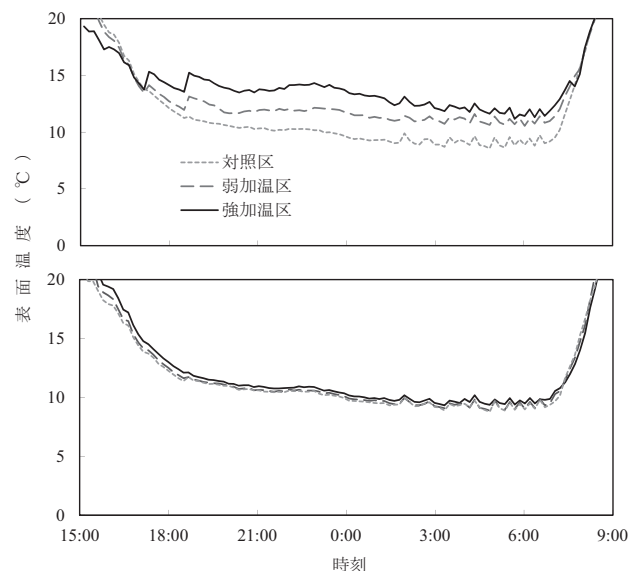


図-16 茎頂部(上)と下位葉(下)の表面温度に及ぼす局所加温の強さの影響

2008年2月27日～28日における各時刻の平均値
温室内は設定温度8℃で暖房を行った

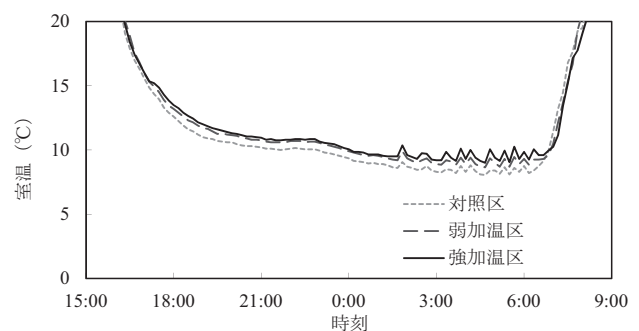


図-17 茎頂部の夜間の室温に及ぼす局所加温の強さの影響
2008年2月27日～28日における各時刻の平均値
温度センサーは群落中央部の1.5mの高さに設置した

に有意な差は認められなかった。また、それ以外の測定日には有意な差は認められなかった(図-18)。一方、'桃太郎はるか'では処理期間を通じ、局所加温の強加温区で最も高く、次いで局所加温の弱加温区、対照区の順であった。特に、2月4日と18日に有意な処理区間の差が認められた。局所加温の処理期間中の平均値を比較すると、'麗容'においては処理区間で有意な差が認められなかったのに対して、'桃太郎はるか'では局所加温の強加温区の方が対照区より有意に高く、局所加温の弱加温区は対照区や局所加温の強加温区との間に有意な差は認められなかった。また、対照区と局所加温の弱加温区においては、'麗容'の方が'桃太郎はるか'より高かったが、局所加温の強加温区においては'麗容'と'桃太郎はるか'との間に有意な差は認められなかった(図-19)。

開花数については、'麗容'と'桃太郎はるか'とも、処理区間の差は認められず、品種間の差も認められなかった(表-8)。着果数については、'麗容'では処理区間の差は認められなかったが、'桃太郎はるか'では局所加温の強加温区の方が対照区より多く、局所加温の弱加温区は対照区や局所加温の強加温区との間に有意な差は認められなかった。また、対照区において'麗容'の方が'桃太郎はるか'より多かったが、局所加温の弱加温区と局所加温の強加温区においては品種間の差は認められなかった。着果率は、'麗容'と'桃太郎はるか'ともに、局所加温の強加温区が最も高く、次いで局所加温の弱加温区、対照区の順となった。'麗容'においては、対照区でも着果率は89.3%であり、局所加温の弱加温区と局所加温の強加温区では着果率はさらに高く、それぞれ95.5%と96.9%となったが、その差は比較的小さかった。一方、'桃太郎はるか'においては、対照区では61.3%で、ほとんど着果しない果房も認められたが、局所加温の弱加温区においては75.1%、局所加温の強加温区においては89.1%となり、局所加温による着果率の向上程度は、'麗容'よりも大きかった。花房間の開花間隔は、'麗容'と'桃太郎はるか'ともに、強加温区の方が対照区より有意に短かったが、局所加温の弱加温区は対照区との間に有意な差は認められなかった。また、いずれの処理区においても、'桃太郎はるか'の方が'麗容'より有意に短かった。収穫果房数については、'麗容'と'桃太郎はるか'ともに、処理区間で有意な差は認められなかった。また、局所加温の弱加温区においては'桃太郎はるか'の方が'麗容'より有意に多かったが、対照区と局所加温の強加温区においては品種間の有意な差

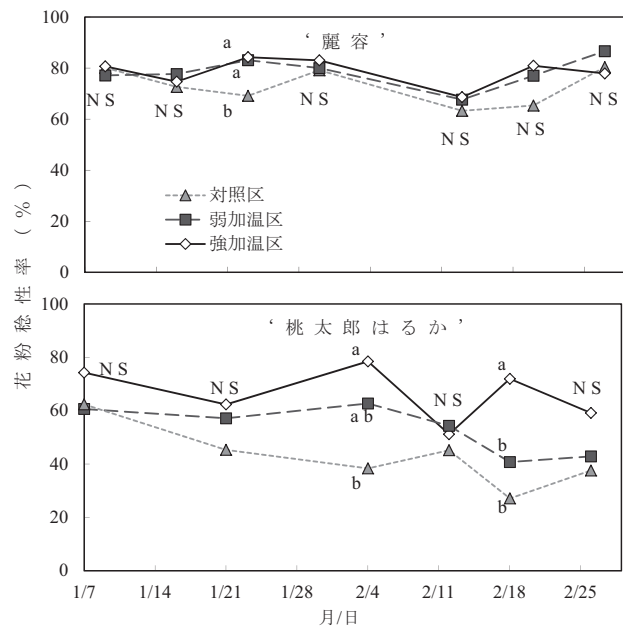


図-18 花粉稔性率に及ぼす局所加温の強さの影響

アークサイン変換後の値を用いて統計処理を行った
Tukeyの多重比較により同一品種および同日内で異なるアルファベット間には有意水準5%で差があることを示す

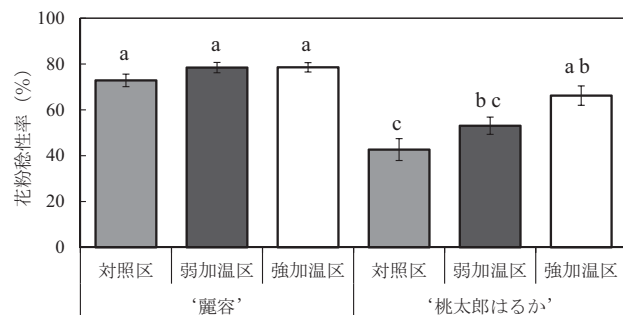


図-19 花粉稔性率の平均値に及ぼす局所加温の強さの影響

アークサイン変換後の値を用いて統計処理を行った
異なるアルファベット間には Tukeyの多重比較により有意水準5%で差があることを示す

は認められなかった。

3) 果実の収穫量に及ぼす局所加温の強さの影響

総収量は、'麗容'においては処理区間で有意な差は認められなかったが、'桃太郎はるか'においては局所加温の強加温区が対照区と局所加温の弱加温区より有意に多くなり、対照区と局所加温の弱加温区との間に有意な差が認められなかった(表-9)。また、対照区と局所加温の弱加温区においては、'麗容'の方が'桃太郎はるか'より多かったが、局所加温の強加温区においては品種間の有意な差が認められなかった。可販果収量と可販果率は、'麗容'においては処理区間で有意な差は認められなかったが、'桃太郎はるか'では局所加温の強加温区が、対照区と局所加温の弱加温区よりも著しく多くなり、対照区と比較して約2.2倍となった。しかし、対照区と局所加温の弱加温区との間には有意な差は

表-8 花芽分化と開花に関連した形質に及ぼす局所加温の強さの影響

品種	局所加温区	開花数 (花/株)	着果数 (果/株)	着果率 ^a (%)	花房間の開花間隔 ^b (日/花房)	収穫果房数 (果房/株)
麗容	対照区	53.6A	47.9A	89.3AB	13.6A	8.7B
	弱加温区	48.7A	46.5A	95.5AB	13.2A	9.0B
	強加温区	49.9A	48.4A	96.9AB	12.5BC	9.3AB
桃太郎 はるか	対照区	56.6A	34.7B	61.3B	12.0BC	9.4AB
	弱加温区	55.0A	41.3AB	75.1AB	11.7CD	10.0A
	強加温区	56.9A	50.8A	89.1AB	11.3D	10.4A

a アークサイン変換後の数値を用いて統計処理を行った

b 第n花房の第1番花開花から第n+1花房の第1番花開花までの日数

同一列内の異なるアルファベット間には Tukey の多重比較により有意水準 5% で差があることを示す (n = 4)

表-9 果実の収穫量に及ぼす局所加温の強さの影響

品種	局所加温区	総収量 (kg/株)	可販果収量 (kg/株)	可販果率 ^a (%)	1果重 (g/果)
麗容	対照区	6.93A	6.35A	91.7AB	144.5A
	弱加温区	7.58A	7.41A	97.7A	163.2A
	強加温区	8.03A	7.73A	96.3A	166.3A
桃太郎 はるか	対照区	3.56B	2.95B	82.8C	97.5C
	弱加温区	4.18B	3.57B	85.3BC	102.3BC
	強加温区	6.82A	6.36A	93.2AB	134.4AB

P^a アークサイン変換後の数値を用いて統計処理を行った

同一列内の異なるアルファベット間には Tukey の多重比較により有意水準 5% で差があることを示す (n = 4)

認められなかった。また、対照区と局所加温の弱加温区においては‘麗容’の方が‘桃太郎はるか’より多かったが、局所加温の強加温区においては品種間に有意な差が認められなかった。1果重は、‘麗容’においては処理区間で有意な差は認められなかったが、‘桃太郎はるか’においては、局所加温の強加温区の方が対照区より有意に大きかった。しかし、局所加温の弱加温区は対照区や局所加温の強加温区との間に有意な差は認められなかった。また、対照区と局所加温の弱加温区において、‘麗容’の方が‘桃太郎はるか’より大きかったが、局所加温の強加温区においては品種間に有意な差は認められなかった。

d 考察

温室全体が低い夜温で維持される中で、茎頂部の局所加温を行った結果、温風が直接当たる茎頂部の表面温度が高く保たれたので、本節で用いた加温方法で、茎頂部の局所加温を実現できることが示された。

着果と気温の関係について、低温から適温の範囲では、気温が高いほど着果は促進されることが知られている (Charles・Harris, 1972)。また、開花花房への赤外線放射による加温でも、着果率が向上することが報告されている (森山ら, 1999)。これらの報告は、局所加温によって茎頂部の表面温度が高くなるほど、着果率が高まった本節の結果とよく一致している。

着果に大きな影響を及ぼすと言われている花粉稔性については、多くの評価方法が存在する。その中で、アセトカルミンによって染色された花粉の割合を調べる方法は、他の方法に比べて簡易で、着果率との相関も高いことが報告されている (Fernández-Muñoz ら, 1994)。本節でも、この方法を用いて調べた結果、花粉稔性率の高い品種や処理区で着果率が高いことが認められた。花粉稔性は、開花2週間前からの低温によって低下することが知られている (Picken, 1984)。したがって、局所加温による花房の表面温度の上昇が室温の低下に起因する花粉稔性の低下を抑制し、着果率の向上に寄与したと考えられる。

総収量や可販果収量についても、局所加温の温度が高いほど多かったのは、着果率の向上に加え、花房間の開花間隔の短縮に起因する収穫果房数や収穫果数の増加が原因であると考えられた。トマトの花芽分化から開花までに要する日数は、高温ほど短くなることが知られている (斎藤, 2004)。これは、茎頂部の表面温度が高いほど開花に要する日数が短縮された本節の結果と一致している。また、1果重の増加も、可販果収量の増加に寄与したと考えられる。一般に、トマトの果実肥大には種子数が大きく関わり、種子数の増加のためには高い花粉稔性が必要とされている (斎藤, 2004)。本節では、‘桃太郎はるか’において、花粉稔性率が低い処理区ほど1果重が小さかったので、花粉稔性は着果率だけでなく、1果重にも影響していると考えられた。さらに、トマトの果実肥大の初期速度は高温ほど大きく、肥大を続ける期間は低温ほど長いことが報告されている (Bertin, 2005)。この点について、本節における局所加温の温度条件について見ると、果実肥大の初期段階は高温によって果実肥大が促進され、その後はつる下ろしによって低い位置へ移されて低温条件になるために肥大の期間が長くなって、1果重の増加に結びついた可能性が示唆され

た。

以上の結果、本節で行った温度処理の範囲では、局所加温の温度が高くなるにしたがって、花粉稔性の低下が抑えられ、着果率が向上することが明らかとなった。同時に、花房間の開花間隔の短縮、1果重の増加によって可販果収量が増加することが示された。これまで、局所加温がトマトの着果率を向上させるという報告はあったが（森山ら、1999）、トマトの長期的な栽培における果実の収穫量への影響を調べた報告はなかったので、本節の実験によって、夜間の室温は低くても、茎頂部を局所的に加温するだけで、果実の収穫量が増加することが示唆された。

本節では、局所加温による植物体の表面温度を熱画像によって調べた結果、局所加温による夜間の茎頂部の温度は一定でなく、その加温範囲は室温や暖房機の運転の有無によって変化していた。したがって、外的要因によって温度や加温範囲が変化しない、より安定した局所加温方法の開発が必要と考えられた。また、本実験の結果、茎頂部を局所的に加温するだけで果実の収穫量が増加する可能性が示唆されたので、慣行暖房法との比較によって、局所加温の省エネルギー効果やその経済性、CO₂の排出量などを評価し、実用化を図る必要があると考えられた。電気温風機では新たに導入コストとランニングコストがかかるので、既存の暖房機を局所加温に利用できるかどうかを次節で検討することとした。

2 茎頂部の局所的な加温が燃料消費量に及ぼす影響

a 緒言

前節において、電気温風機を用いて茎頂部のみを局所的に加温すると、局所加温をしない場合と比較して、着果率の向上や花房間の開花間隔が短縮され、品種によっては、果実の収穫量も増加することが明らかになった。しかし、慣行の加温方法と局所加温の方法とを、温度分布や果実の収穫量および燃料消費量で比較すること、そして生産現場で活用できるような既存の暖房機を用いた局所加温方法を開発することが課題として残された。

そこで本節では、生産現場で実際に利用可能な茎頂部の局所加温方法を開発し、慣行の加温方法と比較して果実の収穫量が劣らず、かつ燃料消費量が削減できることを明らかにすることを目的として、通常は地面上に設置する温風ダクトを栽培ベッド上に吊り下げて、温室内の気温、植物体の表面温度の垂直分布および燃料消費量について調査することとした。

b 材料および方法

1) 栽培概要

材料には、トマトの‘桃太郎ヨーク’（タキイ種苗（株））と‘ビットリオ’（朝日工業（株））を供試した。2009年8月13日に播種し、閉鎖型苗生産システム（商品名「苗テラス」、MKV ドリーム（株））内で4週間育苗した。9月17日に床面積972m²、軒高3.6mの農業用ポリオレフィンフィルムを被覆した温室内に、株間22.5cm、畝間2.1mで定植した。誘引は2.9mの高さで行い、つる下ろし栽培を行った。また、施設内にクロマルハナバチを放飼して受粉に利用した。これ以外の育苗時の条件やその他の栽培条件は前節に準じた。

2) 加温の方法

加温は11月1日～翌年3月31日に行った。温室内に、農業用ポリ塩化ビニル製のカーテン（商品名「カーテンラクダ」、MKV ドリーム（株））を2重に垂直に展張して東西に区切り、東側2/3を慣行区、西側1/3を局所加温区とした。暖房機には、慣行区と局所加温区とも、出力87.2kWの灯油燃焼式の温風暖房機（HK3027型、ネポン（株））を用い、設定温度を13℃として加温した。また、保温を目的として、側面には農業用ポリ塩化ビニル製の内張りフィルムを展張し、天面には夜間（17時～7時）のみ保温カーテン（SLS50型、誠和（株））を2重に展張した。

慣行区では、ポリエチレン製ダクト（折り径60cm）を温風暖房機に接続して、栽培ベッド間の通路の地面上に1つ置きに配置した。また、ダクトにおよそ2m間隔で、直径5cm程度の穴を水平方向に開け、温風を吹き出させた。暖房機の制御用の温度センサーは、高さ1.5mの位置に設置した。循環扇をトマト群落の上部に設置して、水平方向に空気を流動させることで、処理区内での温度の均一化を図った。

局所加温区には、同様のダクトを各栽培ベッド上の高さ約2.7mの位置に吊り下げた。ダクトには、直径1cmの穴を8cm～16cm間隔で水平方向に開け、ダクトの距離による風温の低下を考慮して、暖房機から離れるほど穴の間隔を狭めた。また、暖房機の制御用の温度センサーも、高さ2.7mの位置に設置した。局所加温区では、処理区内の空気循環を抑えることを目的として、循環扇は設置しなかった。

3) 室温と植物体の表面温度および根域温度の測定方法

加温期間中の慣行区と局所加温区における、夜間の地面からの高さ別（2.5m、1.5m、1.0m）の室温を、処理

区と高さ別に1点ずつ、温度計（RTH-3010型、エスベックミック（株））を用いて測定した。また、植物体全体の表面温度を、熱画像測定装置（TH9100型、NEC三栄（株））を用いて5分間隔で測定した。さらに、ロックウール培地の深さ5cmの根域温度を、銅-コンスタンタン熱電対を用いて処理区ごとに3点ずつ測定した。室温と根域温度は10分間隔で測定し、1時間の平均値としてデータロガー（CR1000型、Campbell, Co., Ltd.）に記録した。

4) 花芽分化と開花に関連した形質の調査方法

花芽分化と開花に関連した形質として、花粉稔性率、着果率、成熟日数および花房間の開花間隔を調査した。IV章と同様の方法で、花粉稔性率を測定した。また、着果率、花房間の開花間隔および成熟日数も、IV章と同様の方法で調査した。これらは、加温期間中に開花した花のみを対象として調査した。加温開始時の開花花房は‘桃太郎ヨーク’で第6花房、‘ビトリオ’で第5花房であった。

5) 果実の収穫量の調査方法

果実の収穫量は、加温期間中に開花した花が肥大した果実についてのみ調査した。収穫量の調査方法は前節に準じて行い、収穫は12月31日～6月7日に行った。調査は処理区当たり4反復行い、1反復当たり12～15株ずつ供試した。

6) 群落の受光量と燃料消費量の調査方法

群落の上に吊り下げた温風ダクトがどの程度遮光しているかを調査することを目的として、慣行区と局所加温区において群落の受光量を調査した。1月7～21日の間に積算日射フィルム（商品名「オプトリーフ」R-2D型、大成イーアンドエル（株））を、各株の最上位にある開花花房から上位の葉2枚、下位の葉7枚に、1葉当たり5枚ずつ貼り付けた。それから2週間経過後にフィルムを回収して、フィルムの退色の程度から、単位面積当たりの積算受光量（ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ）を求めた。1処理区当たりの調査株数は4株として、反復を設けなかった。

慣行区と局所加温区の間での燃料消費量を、それぞれの暖房機に接続した流量計で測定した。暖房費は、得られた燃料消費量に試験時における燃料単価（64.5円 $\cdot \text{L}^{-1}$ ）を掛けて表した。

c 結果

1) 室温と植物体の表面温度および根域温度に及ぼす局所加温の影響

栽培期間中における、昼間のハウス内の室温は、慣行区と局所加温区で差はなく、最高室温は25℃程度で推

移した（データ略）。夜間の地面からの高さによる室温の違いは、慣行区では、1月7～10日においてほとんどなく、14℃前後で推移した（図-20A）。一方、夜間における局所加温区の室温は、1.0mと1.5mの高さでほぼ同程度であったが、2.5mの高さの室温は1.5mと1.0mの高さの室温より顕著に高く、15～16℃で推移した（図-20B）。夜間の局所加温区の1.5mと1.0mの高さの室温は時間の経過とともに低くなって、最低室温が11～12℃となり、慣行区と同じ高さの夜間の室温より2℃程度低くなった。

1月14日と15日の深夜における植物体の表面温度は、慣行区では地面からの高さの違っても概ね一様になっていた（図-21）。一方、局所加温区では茎頂部のみで表面温度が上昇し、慣行区より高くなった。また、局所加温区における植物体の表面温度は、地面に近いほど低下し、株元付近では慣行区と比べて明らかに低くなった。たとえば、1月18と19日の午前1～2時における植物体の表面温度の垂直分布（図-22）は室温と同様の傾向を示し、慣行区では茎頂部が13.0℃程度となったのに対して、2.0m以下の高さでは13.5℃となった。一方、局所加温区では茎頂部が14.0℃程度と慣行区より高くなったが、慣行区とは異なって地面に近いほど植物体の表面温度が低下して、株元付近の植物体の表面温度は11℃を下回り、慣行区より2℃以上低くなった。

1月1～29日の根域の最低温度と夜間の平均温度は、局所加温区の方が慣行区より有意に低かったが、室温の差ほどには温度差が現れなかった。また、1日の平均温度は処理区間で有意な差が認められなかった（表-

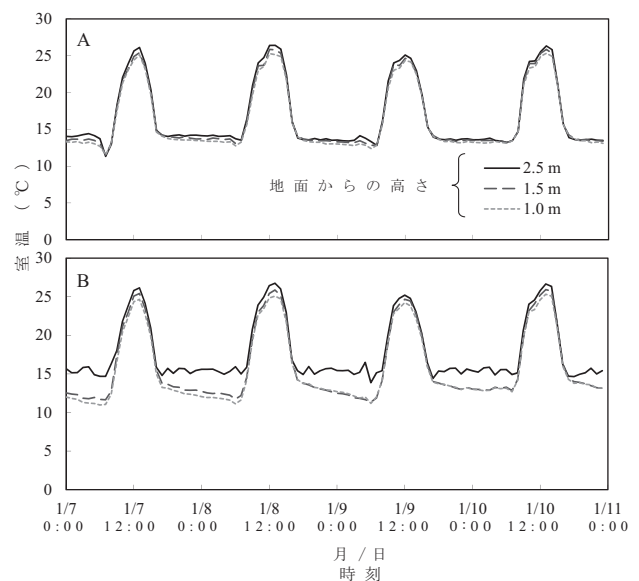


図-20 地面からの高さ別の室温に及ぼす局所加温の影響
A：慣行区，B：局所加温区

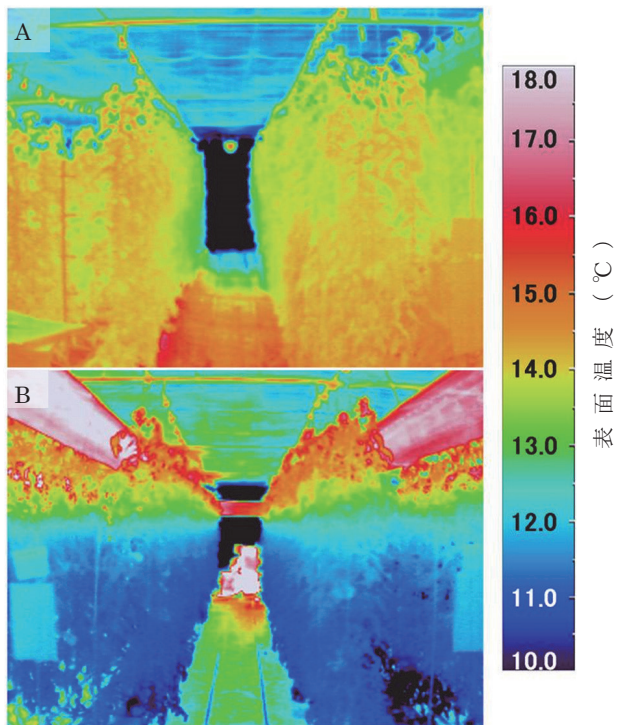


図-21 群落の表面温度に及ぼす局所加温方法の影響

A：慣行区，B：局所加温区

慣行区は2010年1月15日，局所加温区は同14日の午前1時の熱画像を撮影した

10).

2) 着果と果実の収穫量に関連した形質に及ぼす局所加温の影響

着果に関連した形質として，花粉稔性率，開花数，着果率，開花間隔および成熟日数を調査したが，これらの形質は，‘桃太郎ヨーク’においても‘ビットリオ’においても，慣行区と局所加温区との間に有意な差は認められなかった(表-11)。品種間で比較すると，‘ビットリオ’の開花数が，慣行区においても，局所加温区においても，‘桃太郎ヨーク’より有意に多かったが，それ以外の形質には品種間で有意な差は認められなかった。

果実の収穫量に関連した形質に関してみると，‘桃太郎ヨーク’においては，いずれの形質も慣行区と局所加温区との間に有意な差は認められなかった(表-12)。一方，‘ビットリオ’において，総収量，可販果収量および可販果数は局所加温区の方が慣行区より有意に多かった。同様に，1果重は局所加温区の方が慣行区より有意に大きく，可販果率は局所加温区の方が慣行区より有意に高かった。しかし，総収穫果数は慣行区と局所加温区との間に有意な差は認められなかった。次に，品種間で比較すると，慣行区においては，‘ビットリオ’の1果重が‘桃太郎ヨーク’より有意に大きかった他は，品種間において有意な差は認められなかった。局所加温区

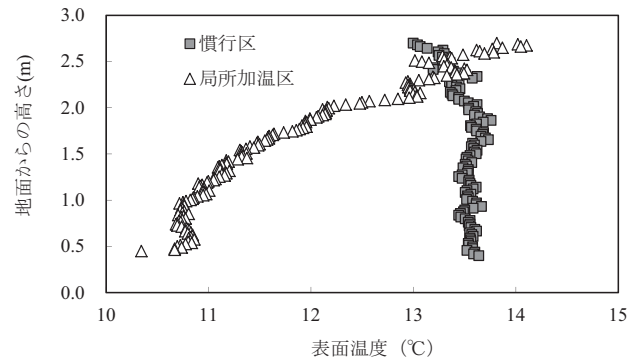


図-22 熱画像解析による植物体の表面温度の垂直分布に及ぼす局所加温の影響

慣行区は2010年1月19日，局所加温区は同18日の午前1時～2時の表面温度の平均値を比較した

表-10 根域の温度に及ぼす局所加温の影響

加温方法	1日平均温度	夜間平均温度 ^a	最低温度 ^b
慣行区	15.8	15.6	14.6
局所加温区	15.6	15.2	13.8
t検定	NS	**	**

a 0～6時と18～24時の根域の平均温度

b 調査期間(1月1～29日)における根域の最低温度の平均値

**：有意水準1%で差があることを示す。

NS：有意水準5%で差がないことを示す

においては，‘ビットリオ’の総収量と可販果収量が‘桃太郎ヨーク’より有意に多く，1果重は‘ビットリオ’の方が‘桃太郎ヨーク’より有意に大きかった。一方，総収穫果数，可販果数および可販果率は，品種間で有意な差は認められなかった。

3) 群落の受光量と燃料消費量に及ぼす局所加温方法の影響

ダクトの吊り下げによる群落の受光量の違いについて，慣行区と局所加温区で比較すると，‘桃太郎ヨーク’においても，‘ビットリオ’においても，個々の葉では処理区間に差がみられた場合もあったが，全体的には処理区間で明確な差は認められなかった(図-23)。また，品種間で比較すると，‘桃太郎ヨーク’の方が‘ビットリオ’より受光量が多かった。

11月1日～翌年3月31日の加温期間中の総灯油消費量を10a当りに換算して表すと，慣行区では7,826L，局所加温区では5,774Lとなり，局所加温区では，慣行区に比べて燃料消費量が26.2%少なかった(表-13)。したがって，暖房費は慣行区でおよそ50万円，局所加温区で37万円と算出され，10a当たりおよそ13万円の暖房費が節減できたと試算された。

d 考察

前節において，トマトの茎頂部を電気温風機で局所的に加温した結果，茎頂部の温度が局所的に上昇して，局所加温をしない場合に比べて着果率，開花間隔などの着

表-11 着果に関連した形質に及ぼす局所加温の影響

品種	加温方法	花粉稔性率 (%)	開花数 (花/果房)	着果率 (%)	花房間の開花間隔 ^a (日/果房)	成熟日数 ^b (日)
桃太郎ヨーク	慣行区	76.9A	4.9B	75.9A	11.0A	69.4A
	局所加温区	78.2A	4.9B	73.6A	10.7A	67.5A
ビットリオ	慣行区	75.7A	6.0A	69.4A	12.1A	65.3A
	局所加温区	79.8A	6.0A	73.7A	12.1A	64.9A

a 第n花房の第1番花開花から第n+1花房の第1番花開花までの日数

b 第1番花の開花から収穫までに要した日数

同一列内の異なるアルファベット間には Tukey の多重比較により有意水準 5% で差があることを示す (n = 4)

表-12 果実の収穫量に関連した形質に及ぼす局所加温の影響

品種	加温方法	総収量 (g/株)	総収穫果数 (果)	1果重 (g/果)	可販果収量 (g/株)	可販果数 (果)	可販果率 (%)
桃太郎ヨーク	慣行区	8093b	56.4a	143.4c	5417b	32.2ab	66.9b
	局所加温区	7926b	53.8a	147.4c	5655b	32.9ab	71.3ab
ビットリオ	慣行区	9118b	53.9a	169.1b	6184b	30.0b	67.8b
	局所加温区	10570a	56.7a	186.3a	7693a	36.2a	72.8a

調査期間：2010年3月1日～4月30日

同一列内の異なるアルファベット間には、Tukey の多重比較により有意水準 5% で差があることを示す (n = 4)

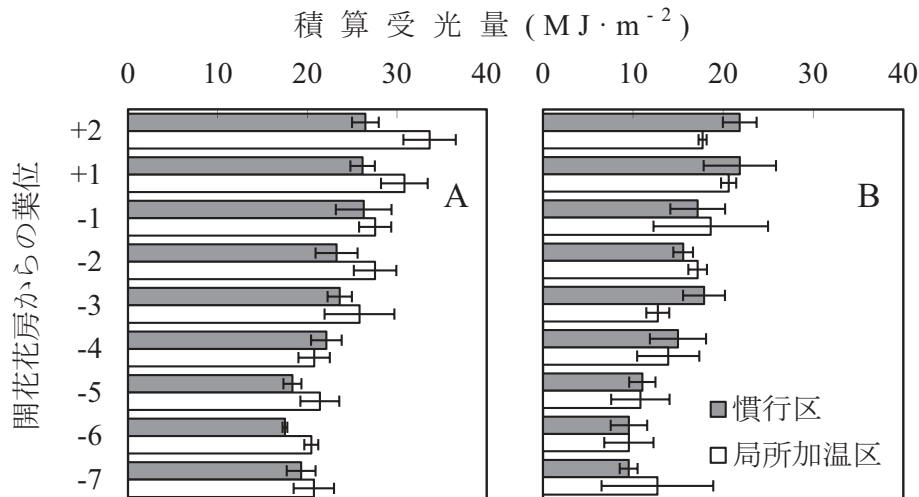


図-23 上位の葉の受光量に及ぼす温風ダクトの吊り下げの影響

A: '桃太郎ヨーク', B: 'ビットリオ'

図中横棒線は標準誤差を示す (n=4)

積算日射テープを2週間貼り付けて積算日射量を推定した

調査期間：2010年1月7～21日

表-13 燃料消費量と暖房費に及ぼす局所加温の影響

加温方法	燃料消費量 ($L \cdot 10a^{-1}$)	暖房費 ^a (千円 $\cdot 10a^{-1}$)	削減率 (%)
慣行区	7826	505	
局所加温区	5774	372	26.2

調査期間：2009年11月1日～2010年3月31日

a 燃料 (灯油) 単価 64.5 円 $\cdot L^{-1}$ として試算した

果に関連した形質が改善されることが明らかになった。そこで本節では、より実用的な加温方法として、通常は地面に這わせて使用される灯油燃焼式温風暖房機に接続した温風ダクトを栽培ベッド上に吊り下げる方法によって、局所加温の有効性があるかどうかについて検討した。

その結果、群落内の高さ別の夜間の室温は、茎頂部で

は局所加温区の方が慣行区より高くなるが、地面付近では低くなったことから、本節の温風ダクトの配置方法で、局所的な加温ができることが示された。温風ダクトの設置高さによる室温の垂直分布の違いに関する報告は見当たらないが、類似の研究例としては、温湯管を用いた研究例がある (Kempkes ら, 2000)。その結果によると、温湯管を用いると、設置の高さを変えても室温の垂直分布の変化は小さいと報告されていて、温風暖房機を用いた本節とは結果が異なっている。これは、温湯管と温風暖房機では、熱の伝達の方法が異なることが (Teitel ら, 1999)、原因であると考えられた。すなわち、温湯管による加温は、長波放射による熱の伝達が主であり、

温風暖房機に比べて熱源からの距離の影響が比較的小さく、施設内を均一に加温しやすいのに対し、温風暖房機による加温は対流と伝導による熱の伝達が主であることから、温湯管に比べて熱源からの距離の影響が大きく、局所加温に適していると考えられた。したがって、茎頂部の局所加温には、温湯管よりも温風暖房機による加温の方が有効であると推察された。また、温度の垂直分布と、温室の軒高との間にも非常に大きな関連があると考えられる。すなわち、本節で用いた温室の軒高は、3.6mと比較的高いので、一般的な温室より、温度の垂直分布の変化の幅が大きくなったと推察された。

次に、根域の最低温度が局所加温区で低下したのは、局所加温区における株元付近の夜間の室温の低下が影響していたと考えられる。この根域温度の低下による影響は本節では判然としなかったが、夜間の平均温度でみると、適温の範囲内であったので（青木，1997）、本節における根域温度の影響は小さかったと考えられた。しかし、外気温や暖房機の設定温度によっては、局所加温による根域温度の低下が根に障害を与える可能性も考えられた。そのため、根域温度の調節の必要性があるかどうかに関しては、今後の検討課題として残された。

トマトの開花数と温度との関係については、生育適温の範囲内で高温ほど開花間隔が縮まり、開花数が増加することが知られており（Adamsら，2001；斎藤・伊東，1962）、前節でも同じような傾向が認められた。一方、本節では、開花数も開花間隔も、局所加温区と慣行区との間で有意な差は認められなかったが、その理由として、局所加温区と慣行区の茎頂部における温度差が、最大でも1℃程度と小さかったことが考えられた。また、慣行区、局所加温区とも、茎頂部の表面温度は13℃以上であり、トマトの夜間の生育適温の範囲内であったことも影響していると考えられた。花粉稔性に関して、多くの低温感受性品種は、10℃以下の低温に遭遇すると、花粉稔性が低下すると言われているが（Fernández-Muñozら，1994）、本節での花房の表面温度は最低でも13℃以上あったので、慣行区も局所加温区も花粉は正常に発達していたと推察された。

トマトの果実重と温度との関係について、果実肥大の初期速度は高温ほど大きく、肥大を続ける期間は低温ほど長いことが報告されている（Bertin，2005）。また、果実の温度が適温の範囲内であれば、低温ほど果実重は大きくなり、果実以外の部位における温度が果実重に及ぼす影響は小さいと言われているので（Adamsら，2001）、本節の局所加温区における果実肥大に伴う温度

の変化を考えると、着果から果実肥大初期までは慣行区と同等かやや高く、肥大中期から後期までは低くなっていたので、局所加温区では、果実重が大きくなりやすい温度条件であったことが理由としてであると推察された。さらに、果実重が大きくなったことで小果の発生が抑えられて、正常果率が高まり、可販果収量が増加したと考えられた。一方、慣行区と局所加温区との間で成熟日数に有意な差が認められなかったが、その理由としては、成熟日数の調査の対象を安定して肥大する各果房の第1果に限定したことが考えられた。

温風ダクトを吊り下げることによる上位葉の受光量低下には明確な差が認められず、ダクトによる遮光の影響は小さいと推察された。トマト草姿には処理区間で差がみられなかったため、ダクトを吊り下げても日中の光合成速度は慣行と同程度であると推察され、ダクト吊り下げによる光環境への悪影響は小さいと考えられた。

暖房費の節減効果については、ハウスを区切った試験であったが、5か月の加温期間で、10a当たりおよそ13万円の燃料費が削減できると試算された。本節における、温風ダクトの吊り下げによる局所加温は、既存の温風暖房機と、各栽培ベッド上に吊り下げる温風ダクトのみを必要とする装置である。そのため、慣行の加温から局所加温に変更するための費用が小額で済み、導入が容易であると考えられた。また、本節では未調査であるが、局所加温によるCO₂排出量については、燃料消費量が減少したことと、新たな資材の導入が不要なことから、慣行より少ないと推察された。

VI 総合考察

本研究は、トマトの施設栽培において、夏季の高温期と冬季の低温期に、慣行の環境制御方法よりも少ないエネルギーで果実の収穫量を維持する方法を開発することを目的として行った。とくに、温度障害が起りやすい根または茎頂部において、夏季には局所的に冷却し、冬季には局所的に加温する方法を開発しようとした。

Ⅱ章では、夏季の高温期における根域の局所冷却を行い、根の機能の変化を中心に生育を調査した。その結果、根域の局所冷却処理開始後の早い段階で、根の内生 IAA 含量が一時的に増加した。また、これに由来すると思われる根の木部の特異的な発達と、養分の吸収や輸送の促進が認められた。これらは、既往の知見にはない新しい発見であり、根における温度反応のメカニズムの解明に寄与するとともに、夏季の高温期における根域の局所冷却の有用性を示すものである。一方、本章にお

ける冷却の期間は最大で14日であったため、果実の収穫量を含めた長期的な根域の局所冷却の影響を明らかにすることはできなかった。しかし、既往の知見では、夏季の高温期における根域の局所冷却によって、果実の収穫量の増加を報告した知見は多いので（藤重ら, 1991; Nkansah・Ito, 1994; 佐々木・板木 1989）、本章における根域の局所冷却でも、同様に果実の収穫量の増加が期待できると考えられた。本章では、NFT水耕でトマトを栽培したので、培養液を冷却して根域の局所冷却としたが、一般的に広く普及している土耕や、ロックウールなどを用いた固形培地耕での栽培では、本章で採用した方法では困難である。その場合は、培地中にパイプを埋設して、パイプ内に冷水を循環させたり（田中・石井, 2000）、通風するなどの方法が必要となる（安場ら, 2006）。したがって、最終的には、根域の局所冷却の方法の選定や、冷却のコストや果実の収穫量の変化を含めた費用対効果を試算して、根域の局所冷却技術としてまとめる必要がある。

Ⅲ章では、冬季の低温期における根域の局所加温を約5か月間行い、Ⅱ章と同様に生育を調査するとともに、果実の収穫量を調査した。その結果、根域の局所加温によって、根の発達が促進され、養分の吸収量と地上部への輸送量が増加し、遅れて地上部の生育が促進された。そのため、Ⅱ章における夏季の高温期における根域の局所冷却と同様のメカニズムで根と地上部の生育が促進されたと考えられたが、根の内生 IAA 含量はⅡ章とは結果が異なり、根の生育とは関連が認められなかった。同様に、根の内部形態も、夏季の高温期における根域の局所冷却では木部の特異的な発達が認められたのに対して、本章では木部を含む根全体がほぼ均一に発達した。根域の温度と根の内生 IAA 含量との関連については既知の知見が見当たらないが、シロイヌナズナにおける葯内のオーキシンの濃度は高温で低下するが、低温では低下しないという報告がある（Sakataら, 2010）。種や部位の違いはあるが、この報告におけるオーキシンの濃度の変化は、本章における根の内生 IAA 含量の変化と一致しているので、本章における根の内生 IAA 含量の温度による変化は妥当であると考えられた。また、果実の収穫量は根域の局所加温によって増加が認められたが、冬季の低温期においてトマトの根域を局所的に加温すると果実の収穫量が増加したという例は学会発表では数件あるものの（Jonesら, 1978; Orchard, 1980）、論文として報告されたものはみられない。そのため、本章における、冬季の低温期にトマトの根域の局所加温を行うこ

とで果実の収穫量が増加したという知見を公表したことは、根域の局所加温の有効性を証明するうえで意義があると考えられた。一方、冬季の低温期における根域の局所加温を実用性のある技術として完成させるためには、施設全体を加温する慣行の暖房方法との比較が必要である。果実の収穫量と、加温にかかる初期投資や燃料消費量を比較して、根域の局所加温の有用性を明らかにできれば、冬季の低温期に有効な局所加温技術として利用できることが予想された。

Ⅳ章では、夏季の高温期において茎頂部の局所冷却を行い、主に着果に関連する形質と、果実の収穫量を調査した。その結果、花粉稔性は対照区と比べて茎頂部の局所冷却によって高くなり、果実の収穫量も増加した。夏季の高温期におけるトマトの局所冷却に関する報告は、すべて根域の局所冷却に関するものであり、根域以外の部位を冷却し、その効果を認めた事例は本研究が初である。一方、その効果はⅡ章、Ⅲ章およびⅤ章の結果と比べると比較的小さかったが、この理由として、冷却時間帯が夜間のみであったことや、冷却時における茎頂部の表面温度の低下が最大でも2℃程度と、他の局所加温や局所冷却の方法に比べて、温度変化が小さかったことが原因と考えられた。したがって、茎頂部の表面温度をより低い温度まで下げることができれば、花粉稔性や着果および果実の収穫量は、本章における結果より良好になると推察された。しかし、温度を下げるためにはヒートポンプの増設やランニングコストの増加による多くの費用が必要となるので、果実の収穫量と、冷却費用との収支を考慮して、最適な管理温度を明らかにする必要がある。

Ⅴ章では、冬季の低温期における茎頂部の局所加温を行い、1節として、電気温風機を用いた茎頂部の局所的な加温が果実の収穫量に及ぼす影響を調査した。その結果、品種によって影響の違いはあるが、茎頂部の表面温度が高いほど、花粉稔性や着果率が高まり、花房間の開花間隔も短くなった。また、'桃太郎はるか'においては、収穫果数の増加による可販果収量の増加が認められた。茎頂部の局所加温の研究例は学会発表が1件あるのみで（森山ら, 1999）、果実の収穫量まで言及した報告はない。そのため、本章において、茎頂部を局所的に加温することで果実の収穫量が増加することを初めて明らかにし、冬季の低温期における省エネルギー型の加温方法として利用できる可能性を示したことは、意義があると考えられた。

次に、Ⅴ章2節として、実用的な茎頂部の局所加温方

法が果実の収穫量と燃料消費量に及ぼす影響を調べることを目的として、既存の温風暖房機に接続したダクトをトマト群落上に吊り下げ、温風を茎頂部に当てることで、新たな資材を必要とせずに、茎頂部を局所的に加温できるかどうかを検証した。ダクトの配置方法に関して、既往の報告では室温の均一化を目的とした報告が存在するのみである(守田・村田, 1975; 守田ら, 1976)。同様に、海外の主な暖房方法である温湯管による暖房についても、配置方法の最適化は室温の均一化を図ったものであり(Kempkesら, 2000)、茎頂部の局所加温という目的で熱源の配置方法について検討した例は本研究が初めてである。本節の結果、施設全体を均一に加温する慣行の加温方法に対して、暖房機の設定温度が同一であれば、茎頂部の局所加温によって、果実の収穫量を維持したまま燃料消費量を削減できることが示された。本章におけるこれらの結果は、施設園芸分野で特に注目されており(河崎, 2010a, 2010b, 2010c, 2013a, 2013b)、現地実証試験を経て、生産現場への早急な普及が望まれる。また、本節における茎頂部の局所加温は、慣行の加温方法と同じ13℃の設定温度としたが、1節における結果から、より高い温度で局所加温をすれば、果実の収穫量が増加することが推察された。すなわち、茎頂部の局所加温による燃焼消費量の削減分を、より高い温度で管理することで相殺すると、慣行の加温方法と同程度の燃料消費量で、慣行より多い果実の収穫量が得られるのではないかと予想された。この比較を含めて、茎頂部の局所加温技術の体系化のためには、燃料費の削減分や、収穫量の増加による売り上げ増加分を経営試算によって比較する必要があると考えられた。

局所温度制御では対象部位の温度のみを制御するので、それ以外の部位の温度は、障害が起こりうる温度になる可能性もある。そのため、茎頂部の局所温度制御では根域の、根の局所温度制御では茎頂部の温度が、適切な温度とならない可能性がある。実際に、冬季の低温期における茎頂部の局所加温を行ったV章2節では、根域の温度低下が認められている(表-10)。本節においては根域の温度低下の幅は小さく、根の低温障害は起こっていないと推察されたが、外気温や施設の構造、暖房機の設定温度などの条件次第では、より低い根域温度になる可能性も考えられた。この問題に関しては、茎頂部と根域両方を同時に冷却もしくは加温することで解決できると考えられた。ただし、その場合の温度制御にかかる初期投資とランニングコストは、単独の局所温度制御の場合と比べて増加することが予想される。したがって、

茎頂部と根域両方の温度制御が必要かどうかを様々な条件下で検討し、必要に応じて組み合わせることが重要であると考えられた。

局所温度制御が及ぼす影響の品種間での違いに関して、夏季の高温期における茎頂部の局所冷却を行ったIV章では、品種間で1果重に及ぼす局所冷却の影響が異なった(表-7)。さらに、冬季の低温期における茎頂部の局所加温を行ったV章では、第1節においても、2節においても、品種間で可販果収量に及ぼす局所加温の影響が異なった(表-9, 表-12)。したがって、茎頂部の局所温度制御が及ぼす影響には、品種間で異なることが示唆された。根域の局所温度制御に関しては、本研究において1品種のみを供試したため判然としなかったが、耐暑性の異なるトマト品種間で、夏季の高温期における根域の局所冷却の影響が異なることが報告されている(Nkansah・Ito, 1994, 1995a)。このことから、茎頂部の局所温度制御と同様に、根域の局所温度制御でも、品種によって影響が異なることが予想される。品種によって局所温度制御の影響が異なる原因は、品種の温度適応性が異なるためであると推察されるので、温度適応性の低い品種ほど、局所温度制御によって果実の収穫量、もしくはそれに関連した形質が向上すると考えられた。しかし、本研究において供試した品種の温度適応性に関しては、ある程度の高低は経験的に知られているものの明確な知見はないので、温度適応性と局所温度制御の影響とを関連付けるためには、品種の温度適応性に関してより詳細な知見が必要であると考えられた。

以上の結果、本研究によって、トマトの施設栽培における夏季の高温と冬季の低温に対して、根域と茎頂部の局所冷却と局所加温が、それぞれ有効であることが示された。これらの局所温度制御を適切に組み合わせることによって、温度障害を緩和し、果実の周年安定生産に寄与する技術として体系化していくことが必要であると考察された。

VII 摘要

近年のトマト施設生産において、多収化を目指した栽培や業務用需要の高まりに伴う周年安定生産技術の開発が望まれている。これを実現するためには、トマトの適温環境から外れる夏季の高温期および冬季の低温期の栽培が問題となり、冷暖房によって施設内気温を適温に近づける環境制御が実施されている。しかし、慣行的な冷暖房の手法は、装置の導入コストやエネルギー消費量の面で課題が残されているので、環境制御の有効性を維持

しつつ、かつ導入コストの低減、消費エネルギーの削減が可能となる技術の開発が求められている。そこで本研究では、トマトの生育適温および障害の発生する温度が部位ごとに異なることに着目し、低温障害や高温障害を受けやすい部位を局所的に加温または冷却する方法を用いて、従来の施設全体を均一に温度制御する方法と同等の果実の収穫量を得ながら、導入コストおよび消費エネルギーの削減を達成することを目標にして、トマトの根域における夏季の高温期の局所冷却と冬季の低温期の局所加温、そして茎頂部における夏季の高温期の局所冷却と冬季の低温期の局所加温を行って、生育や果実の収穫量に及ぼす影響について検討することとした。

まずⅡ章において、夏季の高温期にトマトを NFT 水耕で栽培して、培養液を冷却（根域冷却）した場合の影響を調べた。その結果、根域冷却を行うと、一時的に根のインドール-3-酢酸（IAA）含量が培養液を冷却しない対照区より増加し、根の内部形態は木部特異的な肥大が認められた。さらに、養分の吸収や輸送および出液速度が増加し、根の相対成長速度（RGR）も増加した。また、根の内生 IAA 含量と根の RGR との間に高い正の相関が認められた。これら地下部の特性の変化に続いて、地上部の乾物重も増加した。

次にⅢ章として、冬季の低温期にトマトを NFT 水耕で栽培して、培養液を加温（根域加温）した場合の影響を調べた。その結果、Ⅱ章と同様に、養分の吸収と出液速度が培養液を加温しない対照区より増加し、根の乾物重と RGR も増加した。また、これら地下部の特性の変化に続いて、地上部の乾物重も増加した。一方、根の内生 IAA 含量と根の RGR との間に相関が認められず、また、根の内部形態は皮層も中心柱も木部と同様に肥大し、Ⅱ章の結果と異なった。収穫期における部位ごとの乾物分配率には、根域加温の影響は認められなかったが、根域加温によって茎葉、根、果実を含む全体の乾物重が増加した結果、果実の収穫量と 1 果当たりの果実重は増加した。

Ⅳ章では、夏季の高温期に茎頂部を局所冷却した場合の影響を調べた。その結果、茎頂部を局所冷却した区では、夜間の茎頂部の表面温度が局所冷却を行わない対照区と比べて低下した。一方、下位葉の表面温度に処理区間の違いは認められなかった。また、茎頂部の局所冷却によって、花粉稔性が対照区と比較して高くなった。さらに、収穫果実数と 1 果当たりの果実重が増加し、果実の収穫量が多くなった。

またⅤ章として、冬季の低温期における茎頂部の局所加温の影響について調べた。まず、1 節において、冬季の低温期に小型の電気温風機を用いて茎頂部を局所加温した結果、茎頂部の表面温度が高くなるとともに、花粉稔性と着果率が高まり、花房間の開花間隔が短縮された。さらに、‘桃太郎はるか’においては、茎頂部の局所加温によって果実の収穫量が増加した。次に 2 節において、実用的な茎頂部の局所加温方法として、暖房機に接続する温風ダクトをトマト群落上に吊り下げる方法による局所加温の影響を調べた。その結果、茎頂部の局所加温によって、茎頂部の夜間の室温と、植物体の表面温度は慣行より高くなったが、下位葉の夜間の室温と、植物体の表面温度は慣行より低くなった。果実の収穫量に関して、可販果の割合は局所加温区の方が慣行区より高く、1 果当たりの果実重も局所加温区の方が慣行区より大きくなったので、品種によって程度に差はあるものの、可販果の収穫量が多くなった。燃料消費量は、局所加温区は慣行区と比較して 26.2% の削減となったので、燃料の単価を $64.5 \text{ 円} \cdot \text{L}^{-1}$ とした場合、10a 当たりで年間およそ 13 万円の暖房費が削減できると試算された。

以上の結果、本研究によって、トマトの施設栽培における夏季の高温と冬季の低温に対して、根域と茎頂部の局所冷却と局所加温が、それぞれ有効であると結論付けられた。これらの局所温度制御を適切に組み合わせることによって、温度障害を緩和し、周年安定生産に寄与する技術として体系化していくことが必要であると考察された。

引用文献

- 1) Adams, S. R., K. E. Cockshull and C. R. J. Cave. (2001): Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits. *Ann. Bot.*, **88**, 869-877.
- 2) Ali, I. A., U. Kafkafi, I. Yamaguchi, Y. Sugimoto and S. Inanaga (1996): Effects of low root temperature on sap flow rate, soluble carbohydrates, nitrate contents and on cytokinin and gibberellin levels in root xylem exudate of sand-grown tomato. *J. Plant Nutr.*, **19**, 619-634.
- 3) 青木宏史 (1997): 仕立て方・整枝と生育. 農業技術大系野菜編2 トマト, 463-490. 農山漁村文化協会, 東京.
- 4) Atkin, O. K., E. J. Edwards and B. R. Loveys (2000): Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming. *New Phytol.*, **147**, 141-154.
- 5) Benoit, F. and N. Ceustermans (2001): Impact of root cooling on blossom end rot in soilless paprika. *Acta Hort.*, **548**, 319-323.
- 6) Bertin, N (2005): Analysis of the tomato fruit growth response to temperature and plant fruit load in relation to cell division, cell expansion and DNA endoreduplication. *Ann. Bot.*, **95**, 439-447.
- 7) Bohner, J. and F. Bangerth (1988): Effects of fruit set sequence and defoliation on cell number, cell size and hormone levels of tomato fruits (*Lycopersicon esculentum* Mill.) within a truss. *Plant Growth Regulat.*, **7**, 141-155.
- 8) Bugbee, B. and J. W. White (1984): Tomato growth as affected by root-zone temperature and the addition of gibberellic acid and kinetin to nutrient solutions. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **109**, 121-125.
- 9) Charles, W. B. and R. E. Harris (1972): Tomato fruit-set at high and low temperatures. *Can. J. Plant Sci.*, **52**, 497-506.
- 10) Criddle, R. S., B. N. Smith and L. D. Hansen (1997): A respiration based description of plant growth rate responses to temperature. *Planta*, **201**, 441-445.
- 11) 壇 和弘・大和陽一・曾根一純・沖村 誠・松尾征徳 (2005): イチゴのクラウン部局温度制御が連続出蓄性に及ぼす影響. 園学雑, **74** (別2), 170.
- 12) De Gelder, A., E. Heuveling and J. J. G. Opdam (2005): Tomato yield in a closed greenhouse and comparison with simulated yields in closed and conventional greenhouses. *Acta Hort.*, **691**, 549-552.
- 13) De Koning, A. N. M. (1988): The effect of different day/night temperature regimes on growth, development and yield of glasshouse tomatoes. *J. Hort. Sci.*, **63**, 465-471.
- 14) Deng, W., F. Yan, M. Liu, X. Wang and Z. Li (2012): Downregulation of *SlIAA15* in tomato altered stem xylem development and production of volatile compounds in leaf exudates. *Plant Signal. Behav.*, **7**, 911-913.
- 15) Dobrev, P. I. and M. Kaminek (2002): Fast and efficient separation of cytokinins from auxin and abscisic acid and their purification using mixed-mode solid-phase extraction. *J. Chromatogr. A*, **950**, 21-29.
- 16) Du, Y. C. and S. Tachibana (1994): Effect of supraoptimal root temperature on the growth, root respiration and sugar content of cucumber plants. *Sci. Hortic.*, **58**, 289-301.
- 17) El Ahmadi, A. B. and M. A. Stevens (1979): Reproductive responses of heat-tolerant tomatoes to high temperatures. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **104**, 686-691.
- 18) Fernández-Muñoz, R., J. J. González-Fernández and J. Cuartero (1994): Methods for testing the fertility of tomato pollen formed at low temperature. *J. Hort. Sci.*, **69**, 1083-1088.
- 19) 藤井健雄・石井敏夫(1947): 蕃茄の花の発育に関する研究(第2報). 育苗中の温度と花の分化発育との関係. 園学雑, **16**, 53-65.
- 20) 藤井健雄・伊東 正・椎名不二男・湊 莞爾 (1962): 果菜類栽培温度に関する研究 (1). トマト, キウリの育苗における気温, 地温の影響について. 千葉大園学報, **10**, 59-70.
- 21) 藤重宣昭・杉山直儀 (1968): 果菜類苗の生長におよぼす地温の影響 (予報). 園学雑, **37**, 221-226.
- 22) 藤重宣昭・杉山直儀・尾形亮輔 (1991): トマトの花芽分化と結実に及ぼす根温の影響. 園学雑, **60**, 97-103.
- 23) Gent, M. P. N., J. H. Thorne and D. E. Aylor (1979): Split-night temperatures in a greenhouse: The effects on the physiology and growth of plants. *Conn. Agr. Exp. Sta. Bull.*, **781**.
- 24) Gent, M. P. N. (1984): Carbohydrate level and growth of tomato plants. I. The effect of carbon dioxide enrichment and diurnally fluctuating temperatures. *Plant Physiol.*, **76**, 694-699.
- 25) Gent, M. P. N. (1986): Carbohydrate level and growth of tomato plants. II. The effect of irradiance and temperature. *Plant Physiol.*, **81**, 1075-1079.
- 26) Gent, M. P. N. and Y-Z. Ma (1998): Diurnal temperature variation of the root and shoot affects yield of greenhouse tomato. *HortScience*, **33**, 47-51.
- 27) Gosselin, A. and M. J. Trudel (1983a): Interactions between air and root temperatures on greenhouse tomato: I. Growth, development, and yield. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **108**, 901-905.
- 28) Gosselin, A. and M. J. Trudel (1983b): Interactions between air and root temperatures on greenhouse tomato: II. Mineral composition of plants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **108**, 905-909.
- 29) Gosselin, A. and M. J. Trudel (1984): Interactions between root-zone temperature and light levels on growth, development and photosynthesis of *Lycopersicon esculentum* Mill. cultivar 'Vendor'. *Sci. Hortic.*, **23**, 313-321.
- 30) Handarto, M. Hayashi, E. Goto and T. Kozai (2007): Experimental verification of control logic for operation of a fog cooling system for a naturally ventilated greenhouse. *Environ. Control Biol.*, **45**, 47-58.
- 31) Handarto, M. Hayashi, K. Ohyama, H. Toida, E. Goto and T. Kozai (2006): Developing control logic for a high-pressure fog cooling system operation for a naturally ventilated greenhouse. *Environ. Control Biol.*, **44**, 1-9.
- 32) 林真紀夫 (2003): 温度制御. 五訂施設園芸ハンドブック, 116-157. 日本施設園芸協会, 東京.
- 33) 林真紀夫 (2009): 施設園芸における省エネルギー技術とヒートポンプ. 施設園芸におけるヒートポンプの有効利用, 13-18. 農業電化協会, 東京.
- 34) He, J., S. K. Lee and I. C. Dodd (2001): Limitations to photosynthesis of lettuce grown under tropical conditions: alleviation by root-zone cooling. *J. Exp. Bot.*, **52**, 1323-1330.
- 35) Hewitt, S. P. and O. F. Curtis (1948): The effect of temperature on loss of dry matter and carbohydrate from leaves by respiration and translocation. *Amer. J. Bot.*, **35**, 746-755.
- 36) Hoek, I. H. S., C. H. Hänisch ten Cate, C. J. Keijzer, J. H. Schel and H. J. M. Dons (1993): Development of the fifth leaf is indicative for whole plant performance at low temperature in tomato. *Ann. Bot.*, **72**, 367-374.
- 37) 堀 裕・新井和夫・細谷 毅・小山田光夫 (1968): 培地温と気温の組合せがそ菜の生育ならびに養分吸収に及ぼす影響. I. キュウリ, トマト, カブ, インゲンに関する実験. 園試報 A, **7**, 187-214.
- 38) 堀 裕・新井和夫 (1971): 昼夜温とその組合せがそ菜の生育に及ぼす影響. I. 育苗時の昼夜温の組合せとトマトおよびキュウリ苗の生育, ならびにそれらを均一栽培に移した場合の収量・草型について. 園試報 A, **10**, 205-227.

- 39) Hori, Y. and Y. Shishido (1977) : Studies on translocation and distribution of photosynthetic assimilates in tomato plants. I. Effects of feeding time and night temperature on the translocation and distribution of ^{14}C -assimilates. *Tohoku J. Agri. Res.*, **28**, 26-40.
- 40) 星 岳彦 (2009) : 太陽光利用型植物工場における環境制御システムの展望. 施設と園芸, **144**, 16-21.
- 41) Hurewitz, J. and H. W. Janes (1983) : Effect of altering the root-zone temperature on growth, translocation, carbon exchange rate, and leaf starch accumulation in the tomato. *Plant Physiol.*, **73**, 46-50.
- 42) Iwahori, S. (1965) : High temperature injuries in tomato. IV. Development of normal flower buds and morphological abnormalities of flower buds treated with high temperature. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, **34**, 33-41.
- 43) Jones, D. A. G., I. Sandwell and C. J. W. Talent (1978) : The effect of soil temperature when associated with low air temperatures on the cropping of early tomatoes. *Acta Hort.*, **76**, 167-171.
- 44) Kabu, K. L. and E. W. Toop (1970) : Influence of soil temperature and potassium fertilization on magnesium content of tomato plants. *Can. J. Plant Sci.*, **50**, 740-742.
- 45) 片岡圭子・小西 剛・西川浩次・札植高志・森田隆史 (2001) : 夏季のガラス温室における室内気温低下への細霧冷房の効果. 京大農場報告, **10**, 7-12.
- 46) 河崎 靖 (2010a) : トマトの生長点加温で暖房代二五%減. 現代農業, **89** (12), 172-174.
- 47) 河崎 靖 (2010b) : トマトの生長点局所加温による省エネ効果. 施設と園芸, **150**, 20-26.
- 48) 河崎 靖 (2010c) : トマトの生長点局所加温の方法とポイント. 技術と普及, **47** (7), 16-19.
- 49) 河崎 靖 (2013a) : 温風ダクト吊り下げによるトマト生長点局所加温. 農耕と園芸, **68** (6), 38-41.
- 50) 河崎 靖 (2013b) : トマトの生長点・花房付近の局所加温. 最新農業技術野菜 vol. 6, 204-210. 農山漁村文化協会, 東京.
- 51) Kempkes, F. L. K., N. J. Van de Braak and J. C. Bakker (2000) : Effect of heating system position on vertical distribution of crop temperature and transpiration in greenhouse tomatoes. *J. Agric. Engng. Res.*, **75**, 57-64.
- 52) 木田滋樹・星 岳彦・丸尾 達・荒木陽一・篠原 温 (2007) : SHP 協議会発足にあたって. 施設と園芸, **136**, 49-57.
- 53) Klock, K. A., H. G. Taber and W. R. Graves (1997) : Root respiration and phosphorus nutrition of tomato plants grown at 36°C root-zone temperature. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **122**, 175-178.
- 54) Lingle, J. C. and R. M. Davis (1959) : The influence of soil temperature and phosphorus fertilization on the growth and mineral absorption of tomato seedlings. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **73**, 312-322.
- 55) Lund, H. A. (1956) : Growth hormones in the styles and ovaries of tobacco responsible for fruit development. *Amer. J. Bot.*, **43**, 562-568.
- 56) 松村 司・高砂敦子・浦田貴子 (2003) : ハウス内循環扇が冬季のハウス内温度とユーストマの生育に及ぼす影響. 九州農業研究, **65**, 213.
- 57) Matsuo, S., K. Kikuchi, M. Fukuda, I. Honda and S. Imanishi (2012) : Roles and regulation of cytokinins in tomato fruit development. *J. Exp. Bot.*, **63**, 5569-5579.
- 58) 望月龍也 (2010) : 原産と来歴. 農業技術大系野菜編2 トマト, 3-5. 農山漁村文化協会, 東京.
- 59) Morgan, J. V. and R. O'haire (1978) Heated hydroponic solutions as an energy saving technique. *Acta Hort.*, **76**, 173-180.
- 60) 守田伸六・村田利男 (1975) : 温風暖房のダクト配置が温度分布に及ぼす影響 (1). 暖房機がビニールハウス中央部にある場合. 大阪農技セ研報, **12**, 71-79.
- 61) 守田伸六・村田利男・大森芳道 (1976) : 温風暖房のダクト配置が温度分布に及ぼす影響 (2). 暖房機がビニールハウス妻面側にある場合. 大阪農技セ研報, **13**, 9-16.
- 62) 森山友幸・姫野修一・井出 治 (1999) : トマトの花房への局所加温が着果率に及ぼす影響. 園学雑, **68** (別2), 311.
- 63) 中野明正・河崎 靖・佐々木英和・中野有加・安場健一郎・鈴木克己・高市益行 (2008a) : トマトの根域加温はマグネシウムの吸収を促進することにより葉の黄化を抑制する. 根の研究, **17**, 41-44.
- 64) 中野有加・河崎 靖・鈴木克己 (2008b) : 灌水処理をした栄養成長期と果実肥大期のトマトにおける ^{13}C 光合成産物の分配および出液速度の変化. 園学研, **7**, 209-213.
- 65) 中山秀貴 (2007) : プロア送風受粉法による大玉トマトの着果促進. 東北農業研究成果情報, **21**, 123-124.
- 66) Nightingale, G. T. (1933) : Effects of temperature on metabolism in tomato. *Bot. Gaz.*, **95**, 35-58.
- 67) Nkansah, G. O. and T. Ito (1994) : Comparative studies on growth and development of heat-tolerant and non heat-tolerant tomato plants grown at different root-zone temperatures. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, **62**, 775-780.
- 68) Nkansah, G. O. and T. Ito (1995a) : Effect of air and root-zone temperatures on physiological characteristics and yield of heat-tolerant and non heat-tolerant tomato cultivars. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, **64**, 315-320.
- 69) Nkansah, G. O. and T. Ito (1995b) : Comparison of mineral absorption and nutrient composition of heat-tolerant and non heat-tolerant tomato plants at different root-zone temperatures. *J. Hort. Sci.*, **70**, 453-460.
- 70) Novickienė, L., V. Gavelienė, L. Miliuvienė, D. Kazlauskienė and L. Pakalniškytė (2010) : Analysis of lateral root growth in *arabidopsis* in response to physiologically active auxin analogues. *Acta Agron. Hung.*, **58**, 1-10.
- 71) Ohashi-Ito, K., M. Matsukawa and H. Fukuda (2013) : An atypical bHLH transcription factor regulates early xylem development downstream of auxin. *Plant Cell Physiol.*, **54**, 398-405.
- 72) 及川 仁 (2007) : 地球温暖化及び重油価格高騰に対応する省エネ施設園芸政策. 技術と普及, **44** (11), 20-23.
- 73) Orchard, B. (1980) : Solution heating for the tomato crop. *Acta Hort.*, **98**, 19-28.
- 74) Osborne, D. J. and F. W. Went (1953) : Climatic factors influencing parthenocarpy and normal fruit-set in tomatoes. *Bot. Gaz.*, **114**, 312-322.
- 75) Papadopoulos, A. P., S. Pararajasingham, J. L. Shipp, W. R. Jarvis, T. J. Jewett and N. D. Clarke (1997) : Integrated management of greenhouse vegetable crops. *Hort. Rev.*, **21**, 1-39.
- 76) Peet, M. M., D. H. Willits and R. Gardner (1997) : Response of ovule development and post-pollen production processes in male-sterile tomatoes to chronic, sub-acute high temperature stress. *J. Exp. Bot.*, **48**, 101-111.
- 77) Peet, M. M. and G. Welles (2005) : Greenhouse tomato production. E. Heuvelink (ed.), Tomatoes, 257-304. CABI Publishing, Wallingford.
- 78) Picken, A. J. F. (1984) : A review of pollination and fruit set in the tomato. *J. Hort. Sci.*, **59**, 1-13.
- 79) Pitts, R. J., A. Cernac and M. Estelle (1998) : Auxin and ethylene promote root hair elongation in *Arabidopsis*. *Plant J.*, **16**, 553-560.
- 80) Pressman, E., A. Bar-Tal, R. Shaked and K. Rosenfeld (1997) : The development of tomato root system in relation to the carbohydrate status of the whole plant. *Ann. Bot.*, **80**, 533-538.
- 81) 斉藤 章 (2012) : オランダのトマト生産の現在. エベ・フーヴェリンク編著, トマト オランダの多収技術と理論, 3-20. 農山漁村文化協会, 東京.

- 82) 斎藤 隆 (2004) : 花芽分化の生理, 生態. 野菜園芸大百科第2版第2巻トマト, 52-159. 農山漁村文化協会, 東京.
- 83) 斎藤 隆・伊東秀夫 (1962) : トマトの生育ならびに開花・結実に関する研究 (第1報). 育苗期の温度が生育ならびに開花・結実にあぼす影響. 園学雑, **31**, 303-314.
- 84) 斎藤 隆・伊東秀夫 (1971) : トマトの生育ならびに開花・結実に関する研究 (第12報). 花の発育ならびに形態にあぼす苗の栄養と低温の相互作用の影響. 園学雑, **40**, 354-358.
- 85) Sakata, T., N. Yagihashi and A. Higashitani (2010) : Tissue-specific auxin signaling in response to temperature fluctuation. *Plant Signal. Behav.*, **5**, 1510-1512.
- 86) Sasaki, H., T. Yano and A. Yamasaki (2005) : Reduction of high temperature inhibition in tomato fruit set by plant growth regulators. *JARQ*, **39**, 135-138.
- 87) 佐々木浩二・板木利隆 (1980) : 養液栽培における夏季の地下部冷却が果菜類の生育, 収量にあぼす影響. 生環調, **27**, 89-95.
- 88) 佐藤公洋・北島信之 (2010) : 高設栽培におけるクラウン局部加温の温度がイチゴの生育および収量にあぼす影響. 福岡農総試研報, **29**, 27-32.
- 89) Sato, S., M. Kamiyama, T. Iwata, N. Makita, H. Furukawa and H. Ikeda (2006) : Moderate increase of mean daily temperature adversely affects fruit set of *Lycopersicon esculentum* by disrupting specific physiological processes in male reproductive development. *Ann. Bot.*, **93**, 731-738.
- 90) Sato, S., M. M. Peet and J. F. Thomas (2000) : Physiological factors limit fruit set of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under chronic, mild heat stress. *Plant Cell. Environ.*, **23**, 719-726.
- 91) Sato, S., M. M. Peet and J. F. Thomas (2002) : Determining critical pre- and post-anthesis periods and physiological processes in *Lycopersicon esculentum* Mill. exposed to moderately elevated temperatures. *J. Exp. Bot.*, **53**, 1187-1195.
- 92) 島地英夫 (2003) : 複合環境制御と省エネルギー技術. 五訂施設園芸ハンドブック, 206-216. 日本施設園芸協会, 東京.
- 93) Shishido, Y. and Y. Hori (1979) : Studies on translocation and distribution of photosynthetic assimilates in tomato plants. III. Distribution pattern as affected by air and root temperatures in the night. *Tohoku J. Agri. Res.*, **30**, 87-94.
- 94) 六戸良洋・熊倉裕史 (1994) : トマトにおける光合成・蒸散, 光合成産物の転流・分配および根の呼吸にあぼす培地温の影響. 園学雑, **63**, 81-89.
- 95) Smeets, L. and F. Garretsen (1986) : Growth analyses of tomato genotypes grown under low night temperatures and low light intensity. *Euphytica*, **35**, 701-715.
- 96) 曾根一純・壇 和弘・沖村 誠・北谷恵美 (2007) : 四季成イチゴにおけるクラウン部の管理温度の違いが連続出蓄性にあぼす影響. 園学研, **6** (別1), 423.
- 97) Suzuki, K., H. Takeda, T. Tsukaguchi and Y. Egawa (2001) : Ultrastructural study on degeneration of tapetum in anther of snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under heat stress. *Sex. Plant Reprod.*, **13**, 293-299.
- 98) 田淵俊人 (2007) : ナス科野菜. 金浜耕基編著, 野菜園芸学, 21-44. 文永堂出版, 東京.
- 99) 田中逸夫・石井征亜 (2000) : 埋設パイプ内通水による畝内地温制御時の地温分布に関する数値シミュレーション. 農業気象, **56**, 101-109.
- 100) 田中和夫・安井秀夫 (1986) : 施設内における果菜類の省エネルギー栽培に関する研究. II. トマトの生育にあぼす低温の影響. 野菜試報 A, **14**, 159-168.
- 101) Teitel, M., I. Segal, A. Shklyar and M. Barak (1999) : A comparison between pipe and air heating methods for greenhouses. *J. Agric. Engng. Res.*, **72**, 259-273.
- 102) Tindall, J. A., H. A. Mills and D. E. Radcliffe (1990) : The effect of root zone temperature on nutrient uptake of tomato. *J. Plant Nutr.*, **13**, 939-956.
- 103) 土岐知久 (1970) : 施設栽培における適環境条件の生理的研究. 第1報. キュウリの栽培温度の解析. 千葉農試研報, **11**, 62-72.
- 104) 土岐知久 (1975) : 施設栽培における適環境条件の生理的研究. 第2報. 日中の光条件が果菜類の温度管理にあぼす影響. 千葉農試研報, **16**, 31-42.
- 105) 王 玉海・橘 昌司 (1996) : キュウリの初期生長と無機栄養にあぼす高気温と高地温の影響. 園学雑, **64**, 845-852.
- 106) Went, F. W. (1943) : Plant growth under controlled conditions. I. The air-conditioned greenhouses at the California Institute of Technology. *Amer. J. Bot.*, **30**, 157-163.
- 107) Went, F. W. (1944a) : Plant growth under controlled conditions. II. Thermoperiodicity in growth and fruiting of the tomato. *Amer. J. Bot.*, **31**, 135-150.
- 108) Went, F. W. (1944b) : Plant growth under controlled conditions. III. Correlation between various physiological processes and growth in the tomato plant. *Amer. J. Bot.*, **31**, 597-618.
- 109) Went, F. W. (1945) : Plant growth under controlled conditions. V. The relation between age, light, variety and thermoperiodicity of tomatoes. *Amer. J. Bot.*, **32**, 469-479.
- 110) Willits, D. H., M. M. Peet (1998) : The effect of night temperature on greenhouse grown tomato yields in warm climates. *Agric. For. Meteorol.*, **92**, 191-202.
- 111) Wilson, A. K., F. B. Pickett, J. C. Turner and M. Estelle (1990) : A dominant mutation in *Arabidopsis* confers resistance to auxin, ethylene and abscisic acid. *Mol. Gen. Genet.*, **222**, 377-383.
- 112) Wittwer, S. H. and F. G. Teubner (1955) : Cold exposure of tomato seedlings and flower formation. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **67**, 369-376.
- 113) Wittwer, S. H. and F. G. Teubner (1957) : The effects of temperature and nitrogen nutrition on flower formation in the tomato. *Amer. J. Bot.*, **44**, 125-129.
- 114) 山口武視・津野幸人・中野淳一・真野玲子 (1995) : 水稻の茎基部からの出液速度に関与する要因の解析. 日作紀, **64**, 703-708.
- 115) Yamamoto, K. (2000) : Estimation of the canopy-gap size using two photographs taken at different heights. *Ecol. Res.*, **15**, 203-208.
- 116) 安場健一郎・黒崎秀仁・高市益行・大森弘美・川嶋浩樹・星岳彦 (2009) : 自律分散型環境制御システムを利用した細霧冷房支援のための温室換気率および蒸発散速度計算ノードの開発. 植物環境工学, **21**, 162-168.
- 117) 安場健一郎・屋代幹雄・松尾健太郎 (2006) : 多孔質フィルム製ダクトを使用した冷却チューブによるハウレンソウの根域冷却. 園学雑, **75**, 109-115.
- 118) 吉岡 宏・高橋和彦 (1981) : 果菜類における光合成産物の動態に関する研究. V. トマトにおける¹⁴C同化産物の昼夜間の転流割合と, 転流・分配にあぼす光・夜温の影響. 野菜試報 A, **9**, 63-81.
- 119) 吉岡 宏・高橋和彦・新井和夫・長岡正昭 (1977) : 果菜類における光合成産物の動態に関する研究. I. トマトの¹⁴C同化産物の転流・蓄積にあぼす夜温, 地温並びに生育中の照度, N濃度処理の影響. 野菜試報 A, **3**, 31-41.
- 120) FAOSTAT (2011) : <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/E> (Browsed on May/1/2016).
- 121) 農林水産省統計部 (2011) : 園芸用施設及び農業用廃プラスチックに関する調査. <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001074417> (2016/5/1 閲覧).
- 122) 農林水産省統計部 (2012) : 農作物価統計. <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001102155> (2016/5/1 閲覧).
- 123) 農林水産省統計部 (2013a) : 平成23年野菜生産出荷統計. <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001102731> (2016/5/1 閲覧).
- 124) 農林水産省統計部 (2013b) : 平成23年青果物卸売市場調査報告. <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001106335> (2016/5/1 閲覧).

Development of Local Temperature Control Systems for Year-Round and Stable Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Production

Yasushi Kawasaki

Summary

In recent greenhouse production of tomato (*Solanum lycopersicum* L.), techniques to realize year-round and stable productions are desired for higher yield and commercial use. To achieve this, it is important to overcome suboptimal temperature conditions, such as high temperatures in summer and low temperatures in winter. Heating or cooling air is a practical solution to this. However, the initial cost and energy consumed are shortcomings that need to be addressed. Therefore, a new technique is needed to reduce energy consumption with low initial cost. The sensitivity of different parts of the tomato plant to temperature differs. In this study, therefore, we focused on controlling temperatures that resulted in temperature-related injury in the more sensitive parts of the tomato plants. If temperatures experienced by temperature-sensitive parts such as shoot apex, flowers, and roots are controlled locally, energy consumption can be reduced without loss of fruit yield when compared to conventional temperature management, under which ambient temperature in the greenhouse are controlled uniformly. Therefore, we cooled the root zone under high temperature condition in summer and heated this zone under low temperature condition in winter to reveal the influence of local temperature control on the root zone. Furthermore, shoot apexes and flowers were cooled or heated to clarify the effect of local temperature control around the shoot tips.

In chapter II, we describe the cultivation of young tomato plants in a hydroponic system with a cooled nutrient solution by using nutrient film technique (NFT) under high temperature conditions. This cultivation method was used to acquire information about the physiological and morphological effects of root-zone cooling. We investigated plant growth, nutrient uptake, root activity (xylem exudation and root respiration rate), root indole-3-acetic acid (IAA) concentration, and internal root structure. The root-zone temperature was maintained at 24.7°C by cooling, which is considered the optimum temperature for tomato plants. The air and control temperatures were higher than this optimum (30.8 and 33.7°C, respectively). Root-zone cooling increased the relative growth rate (RGR) of roots compared with the control, followed by increased RGR of shoots. Root IAA was positively correlated with root RGR. Root-zone cooling increased Ca and Mg uptake, as well as root xylem exudation and respiration. It also advanced the development of the internal structure of the xylem near the root tip. Thus, possibly by increasing root activity and root IAA, root-zone cooling promoted root growth and nutrient uptake mediated by the development of the root xylem, and thus, further improved shoot growth. These results suggest a physiological and morphological mechanism of growth enhancement by root-zone cooling under high air temperature conditions. These results are detailed in Chapter II.

In Chapter III, we detail our study on the physiological and morphological effects of root-zone heating. For this, as an economical option at low air temperatures, we grew tomato plants on an NFT hydroponic system in a heated nutrient solution. We investigated the effects of short-term root-zone heating after transplanting and long-term heating until harvest. We measured short-term plant growth, nutrient uptake, root activity, IAA concentration, internal root structure, and long-term fruit weight and dry matter distribution. The minimum root-zone temperature was maintained at 16.6°C while the minimum air temperature (5.9°C) and minimum root-zone temperature (5.8°C) in the control were lower than optimal. Similar to the results reported in Chapter II,

root dry weight and RGR increased after 7 days of root-zone heating, compared with those of the control. This was accompanied by increased mineral nutrient uptake and xylem exudation. These changes may explain the increased shoot growth after 21 days of heating. In roots, development of the epidermis and stele, including the xylem, was promoted by heating, in contrast to the effects of root-zone cooling, which promoted only xylem-specific development. This could be explained by a lack of correlation between root IAA concentration and root RGR. Although the proportion of dry matter distributed to the fruit was not changed by root-zone heating, individual fruit size and total yield were higher than in the control because of a higher total dry weight in the heating treatment. Our results suggest that root-zone heating is an effective low-cost heating technology at low air temperature because of its effect on root activity, growth, and fruit yield, but that the mechanisms may differ from those in root-zone cooling at high air temperatures.

In Chapter IV, we detail the experiment where we tested a local cooling system that cools the air around flowering trusses and shoot apices at night by using a heat pump with a hanging air duct. In order to reveal the effect of the local cooling system, temperature conditions, and characteristics related to fruit yield were compared with non-cooling treatment. Local cooling reduced the night air and surface temperatures around the flowering trusses by $\sim 2^{\circ}\text{C}$, but did not change those lower down the plant. It resulted in increased pollen viability (measured as the proportion of pollen that accepted an acetocarmine stain), fruit number, and individual fruit weight, and thus marketable fruit yield. These results show that local cooling alleviated the effects of high-temperature on tomato during summers in greenhouses.

In Chapter V, we detail our investigation on the influences of local heating around flowering trusses and shoot apices under low air temperature conditions. First, we used a small electric heater to provide local heating around flowering trusses and shoot apices, and examined differences in surface temperatures and fruit yield. We measured the surface temperature of tomato plants using thermography, and examined some characteristics related to fruit yield. Tomato plants were grown using two local heating treatments ("high," with an average night temperature of 13.0°C at the surface around the shoot apex, and "low," with a surface temperature of 11.5°C) under the lowest night temperature of 8°C , as well as a control condition, with a surface temperature of 9.6°C . The surface temperatures of shoot apices were increased by the local heating, although the lower leaf temperatures were not. Pollen viability, fruit set, and intervals between flowering days of adjacent trusses were improved by local heating, although cultivars appeared to differ in their responses.

Second, in order to develop a more useful local heating system, we examined the system with air ducts hung above the culture beds supplying warm air to shoot apices and flowering trusses, and clarified the economic and physiological effects. Differences in the vertical distributions of surface temperature at night, fruit yield, and fuel consumption were investigated. As a result of the local heating, the temperature of air and plant surface in the upper part of the plant at night were slightly higher than the corresponding temperatures recorded in the control, where conventional air duct on the ground was used. However, the air and plant surface temperatures in the lower part of the plant were considerably lower. The commercial fruit yield when this local heating system was used tended to be greater than those in the control because of a higher ratio of intact fruit and fruit weight after exposure to local heating. Fruits grown by local heating had a higher ratio of locule tissue. The local heating system used 26.2% less fuel per unit area than the control.

In this study, we concluded that local heating in winter and cooling in summer on root-zone and around shoot tips were effective for greenhouse tomato production. If these techniques are combined adequately, temperature injuries can be alleviated with lower costs, and this will contribute to year-round and stable tomato production in greenhouses.