博士論文

トマトの尻腐れ果発生要因に関する研究

-果実へのCa転流と肥大速度が尻腐れ発生に及ぼす影響-

2017年 3月

大山 光男

岡山大学大学院

環境生命科学研究科

第1章 序論

第2章 中玉トマトの尻腐れ果発生および果実中の水溶性 Ca 濃度の季節変化と 果実肥大速度の関係

- 2.1 緒言
- 2.2 材料および方法
- 2.3 結果
- 2.4 考察
- 2.5 摘要

第3章 補光による明期延長が中玉トマトの尻腐れ果発生および果実中の Ca 濃度に 及ぼす影響

- 3.1 緒言
- 3.2 材料および方法
- 3.3 結果
- 3.4 考察
- 3.5 摘要

第4章 がくからの蒸散抑制が中玉トマトの尻腐れ果発生と果実中のCa濃度に

及ぼす影響

- 4.1 緒言
- 4.2 材料および方法
- 4.3 結果
- 4.4 考察
- 4.5 摘要

第5章 総合考察

第6章 摘 要

謝辞

引用文献

第1章 序 論

1.1 研究の背景

トマトは日本国内でも年間約72万トンが生産されており(農林水産省,2016),世界全体 では年間1億トン以上,生産金額は960億ドルを超えており(FAOSTAT,2013),最も生 産金額の大きい野菜となっている. 尻腐れは古くから知られたトマトの重要な生理障害 の1つであり,開花後2週間前後の果実の急速肥大期に集中して発生する. 果実の外部 からは,果実の頂端部果皮に現れる滲み(水浸状組織)として初期症状が確認される場 合が多く,短期間に果実頂端部全体に茶褐色の壊死した組織が拡大する(第1図A,B). 尻腐れは,果実頂端部果皮から発生するだけでなく,胎座や種子周辺の柔組織に内部尻 腐れが発生することもある(Adams・Ho,1992;Estabrooks・Tieseen,1972;Ho・White, 2005;Spurr,1959;第1図C,D). 内部尻腐れは,症状が進行して果皮に及ぶまで, 果実外部からは発生を確認することが困難なことが多い.



第1図 中玉トマト 'シンディスイート'果実に発生した尻腐れ
 A:頂端部に発現した初期の水浸状組織(秋作,開花後10日),
 B:頂端部に拡大した尻腐れ(秋作,開花後17日)
 C:内部胎座部に発症した尻腐れ果(秋作,開花後21日),
 D:内部尻腐れ(春作,開花後16日)

尻腐れが発生すると果実の商品価値を著しく損なうため、これまで多くの研究がなさ れており, 尻腐れは, 大玉トマトに比べて, 中玉トマトやミニトマトでは発生しにくく (Ho・White, 2005), 品種によって感受性に差異が存在することも報告されている (Adams · Ho, 1992; Belda ら, 1996). 作型との関係では、気温が低く、短日で日射 強度も弱い秋冬季に比べて、気温が高く、長日で日射も強い春夏季に尻腐れが多発する ことも多くの報告がある(Ho ら, 1993; Yoshida ら, 2014). さらに栽培方法・条件と 尻腐れ果の発生率の関わりに関する報告もこれまで数多くなされている.多くの実験・ 調査が報告されてきたなかには果実の Ca 濃度は必ずしも関与しないとする報告もあるが (Nonami ら, 1995), Lyon ら(1942)の報告以来, 尻腐れには Ca 栄養が関係することは 一般的な見解といえる. しかし, Saure (2001) のレビューにもあるように, これまでの実 験・研究結果から報告されている尻腐れ発生に関わると思われる要因・条件は多様で、相 反する結果も報告されており、尻腐れの詳しい発生要因については未だ十分理解されてい ない. このような状況にあって, Ho・White (2005) は, これまでに報告されている多様 な要因を細胞レベルで分析し、尻腐れの発生要因は「果実の Ca 要求量に、果実への Ca 供給量が追い付かない」状態に帰結し、この状態がアポプラストの Ca²⁺欠乏状態を引き 起こす結果,尻腐れが誘発されるのではないかと推察した.

植物体中の Ca はペクチン質の架橋構造を形成しており,細胞壁中に多量に存在する (Taiz・Zeiger, 2002a). 一方,細胞内の様々なシグナル伝達などに利用される Ca²⁺が,細 胞膜上の輸送体を介してアポプラストと細胞質基質との間で調節されている(White・ Broadley, 2003)が,細胞質基質中の濃度はアポプラストと比較して著しく低いことが知ら れている(Gilory ら, 1993).また, Ca²⁺は細胞の伸長過程で信号伝達にも深くかかわっ ていると考えられている(Hepler, 2005; Wolf ら, 2012).de Freitas ら (2011)は, 尻腐れを発症した果実では,果実先端部全体の水溶性 Ca 濃度が低下していなくても,アポ プラストの水溶性 Ca 濃度だけが低下することがあると報告している.また, Ho・White (2005)

 $\mathbf{2}$

は尻腐れの初期症状として細胞膜の異常が観察されると報告しており,Suzuki ら (2003) は尻腐れにより壊死した組織周辺の細胞に原形質分離を観察している.これらのことから, 果実先端部アポプラストの水溶性 Ca 不足は尻腐れ果発生に直接的に関与しており,細胞壁 や膜構造などの恒常性維持システム破綻の原因となっている可能性が考えられる.近年, 尻腐れ果発生率と果実の水溶性 Ca 濃度との間の負の相関が相次いで報告されているこ とからも (de Freitas ら, 2011;大山ら, 2016;寺林ら, 1988;吉田ら, 2012;Yoshida ら, 2014) 果実の Ca 濃度,特にアポプラストの Ca²⁺濃度が極度に低下した状態での果 実の急速な肥大,つまりアポプラストの Ca²⁺の欠乏状態が細胞生理の異常を引き起こす 結果,尻腐れが誘発されるとする仮説は否定できないように思われる.

1.2 研究の目的, 方法および範囲

これまでに蓄積された知見や経験により,一般的な栽培では尻腐れの発生は制御可能に なりつつある.しかし,水ストレスや塩ストレスにさらされることが多い,高品質トマト・ 高糖度トマトの栽培や春夏季の栽培などでは尻腐れが多発することがある.特に日本では トマト生産量の 90%以上が生鮮トマトであり(農林水産省,2016),付加価値の高い高品質 トマト・高糖度トマトの生産で尻腐れ防除は依然大きな課題の一つとなっている. 尻腐れ の防除を的確に効率よく行うには,その要因をより正確に理解することが必要であるが, 先に述べたように,長年にわたって研究・実験が行われてきたにもかかわらず,トマトの 尻腐れの要因は未だ十分には理解されていない.

果実の Ca 要求量は果実の肥大速度と密接に関係する. 一方, Ca は師管を転流しにくいこ とから(Taiz・Zeiger, 2002b), 果実への Ca 供給は主として果実に流入する木部導管流 が担うと考えられる(Ehret・Ho, 1986a; White・Broadley, 2003). つまり, 根から吸 収された Ca は木部導管流によって地上部に運ばれ,一部が果実に供給される. したがって, 果実への Ca 供給量は, 大きく分けて, 根からの Ca 吸収量と, 根から吸収した Ca の果実へ の分配により決定されることになる.

3

そこで本研究では、尻腐れ果発生率が高まる春夏期の栽培における尻腐れ果の発生要因 を栽培実験により明らかにすることを目的とした.そのため、果実の肥大速度に留意しつ つ、Caが転流する木部導管流の植物体中の流れ、果実への分配に着目して「果実のCa要求 量に、果実へのCa供給量が追い付かない」状態となるリスクを高める要因を特定すること を試みた.そして、そのような状態に陥るリスクを軽減することによる尻腐れの防除方法 を検討した.

本研究ではすべての実験で中玉トマトを供試した.中玉トマトは、大玉トマトと同様の 栽培条件下で尻腐れ症状を発現することはまれなため、尻腐れ果発生に各種の要因が及ぼ す影響の違いをより明確に識別することが可能であり、大玉トマトで得られた仮説の検証 にも有効と考えられた.また、大玉トマトに比べて尻腐れの症状の発現の形態がシンプル で、果実の外部から速やかに確認可能な場合が多く、尻腐れ発症時の環境・気象条件をよ り正確に推測可能である.さらに、サンプル数を確保しやすいという点でも実験を実施す るうえで有利と考えられた.栽培実験は、Ca/K 比の異なる培養液を用いた根域制限栽培に より、岡山大学の大型プラスチックハウス内で行った.この方式では、作型に応じて Ca/K 比を変更することにより尻腐れ果発生率をコントロールすることができ、本研究における 実験を行う上で有利である(吉田ら、2012; Yoshida ら、2014; 大山ら、2016).

第2章では気温と日射量が大きく異なる2つの作型で栽培実験を行い,栽培季節の違い が尻腐れ果発生率と果実中のCa濃度に与える影響を調査した.果実中の水溶性Caの濃度 と尻腐れ果発生率,果実の肥大速度と果実中の水溶性Ca濃度との関係から尻腐れの発生要 因を考察した.第3章では短日の秋冬期にメタルハライドランプを用いた補光により明 期を春夏期と同程度まで延長し,約16時間の長日条件がトマト果実中のCa濃度と尻腐 れの発生に及ぼす影響を調査した.補光強度と葉の気孔コンダクタンスの関係を調査し, 長日条件下の葉からの蒸散が果実中のCa濃度と尻腐れ果発生率に及ぼす影響を考察し た.第4章では着果時にがく片をすべて切除,あるいはワセリンを塗布し,がくからの蒸

4

散抑制が果実中の Ca 濃度,および尻腐れ果発生率に及ぼす影響を調査した.果実に付着し て存在する蒸散器官であるがくが,果実肥大初期に果実への Ca 供給に果たす役割について 考察した.

第5章では本研究における実験結果を総合して尻腐れの発生要因と防除方法を考察した. 果実の肥大速度と果実へのCa供給の観点から,特に植物体中の木部導管流の流れと果実へ の分配に注目し,尻腐れ発生のリスクを高める要因を推定し,有効な尻腐れの防除方法を 検討した.

第2章 中玉トマトの尻腐れ果発生および果実中の水溶性 Ca 濃度の季節変化と

果実肥大速度の関係

2.1 緒 言

トマト果実の尻腐れは気温・日長・日射量がいずれも増加する晩春から夏に多発する傾向にあり(Hoら,1993),著者らが行ってきたこれまでの実験でもこの時期に果実中の水溶性 Ca 濃度が低下し,尻腐れ果発生率が高くなることが確認されている(Yoshidaら,2014). 尻腐れ果を誘発する「果実への Ca 供給量が追い付かない」状態とは,「果実中の水溶性 Ca 濃度,特に代謝に必要なフリーの Ca²⁺濃度が極めて低い状態で果実の肥大が起こる」こと を意味しており,果実先端部における水溶性 Ca 濃度の低下がその状況を示す指標となり得 ると推論することができる.第2章では,尻腐れ果発生頻度が低い中玉トマトを用いて, 環境要因がトマトの尻腐れ果発生と果実中水溶性 Ca 濃度との関係に及ぼす影響について検 討した.

本実験では、Yoshida ら(2014)と同様に Ca/K 比の異なる培養液を用いて気温と日射量 が大きく異なる作型で根域制限栽培を行った.中玉トマトの尻腐れ果発生と果実中の水溶 性 Ca 濃度に及ぼす影響を調査し、その季節変化と果実肥大速度の関係について検討した. また、育苗期の低 Ca 濃度培養液施用の影響についても併せて調査した.

2.2 材料および方法

実験は春作,秋作の2回行った.2つの実験にはいずれも中玉トマト÷シンディスイートø ((株)サカタのタネ)を供試し,岡山大学の間口6m,奥行19m,軒高3mのプラスチッ クハウス内で,中央部に設置した地上高75cmの架台1列を用いて栽培実験を行った.栽培 は,600mLの培地(イチゴ育苗培土,住化農業資材(株))を満たした12cm黒ポリポット を用いた根域制限の養液栽培で行った.培養液施用は日射比例制御として点滴かけ流しで 給液し,給液量の約10%が排出されるように給液量を調節した(吉田ら,2007).培養液は Hoagland 処方(Hoagland・Arnon,1950)の微量要素を加えた園試処方培養液を対照として, Ca/K 比のみを変更した2水準の低Ca 濃度培養液(1/4Ca,1/8Ca)を栽培季節に応じて施用 した(第2-1表).

培養液	Ca/K ratio (me·L ⁻¹)	Ca	К	NO ₃	NH4	Р	Mg	SO ₄
園試処方	8 / 8	4	8	16	1.3	1.3	2	2
1/2Ca	4/12	2	12	16	1.3	1.3	2	2
1/4 C a	2/14	1	14	16	1.3	1.3	2	2
1/8Ca	1/15	0.5	15	16	1.3	1.3	2	2

第2-1表 培養液の多量要素濃度 (mmold-1)

すべての培養液にはHoagland and Arnon (1950)に規定された微量要素を加え, 0.2 mM Ca と 0.1 mM Mg を含むEC値9 mSom⁻¹の水道水を希釈に用いた.





1/2STD: 園試処方標準の1/2濃度培養液

- 1/4Ca(E): 1/4Ca 早期処理区
- 1/4Ca(R): 1/4Ca 回復区

1/8Ca(E): 1/8Ca 早期処理区

(1) 春作(実験1,高温高日射期)

培養液は園試処方および 1/4Ca の 2 水準とし(第 2-1 表),園試処方区,1/4Ca 区,1/4Ca 早期処理区,回復区の4つの処理区を設け,各6個体を供試した(第 2-1 図).2011年4月 4日に育苗培養土(バーミックス,旭工業(株))に播種,4月21日に12 cm ポットに鉢上 げし,5月13日にポットを株間20 cm の1条植えで架台にセット(定植)し,左右交互に 条間50 cm で振り分けて誘引した.1列の両端にはボーダー各2個体を置いた.培養液は, 園試処方区と1/4Ca 区では鉢上げ以降定植まで園試処方1/2濃度液を給液し,定植後はそれ ぞれ園試処方,1/4Ca 培養液を給液した.1/4Ca 早期処理区と回復区では鉢上げ以降第1果 房の花芽の分化が始まるとされる本葉2葉期に達した4月27日までは園試処方1/2濃度液 を給液し,それ以降は定植まで標準濃度の1/4Ca 培養液を給液した.回復区については定植 時以降,園試処方培養液を給液した(第 2-1 図).

第1果房第1花は定植6日後の5月19日から開花し始めた. 植物体は第3果房の上2葉 を残して摘心し,各果房第3花開花時にトマトトーン(4-CPA)100倍液を処理し,8果を 残して摘花した.それぞれの花の開花日を記録し,果房に果実が存在する期間は,毎日正 午頃に各果実の尻腐れ症状の発現の有無をチェックし,初めて尻腐れの症状を認めた日付 を記録した.

開花 16 日後を基準に、Ca 濃度分析に十分な量の試料を確保可能な果実重3gを目安とし て Ca 分析用の果実を採取した.各果房の第1果を、第1果の肥大が劣り Ca 濃度分析に適 さない場合は第2果を果房基部果実とした.また、採取可能な第8果または第7果を採取 し、先端部果実とした.採取した果実はがくおよび果柄を除去して全果実重を測定した後、 赤道面で切断して、頂端側 1/2を厚さ1~2mmにスライスした後、重量を記録し、15mlの 遠沈管に入れた10mlの99%エタノールに浸漬して、4℃で貯蔵した.1日以上貯蔵した後 Yoshida ら (2014)の手順に従って水溶性、NaCl 可溶性、HCl 可溶性の3つに分画して順に Ca を抽出し、原子吸光分光光度計(SPCA-6210、(株)島津製作所)により Ca 濃度を定量

8

した.1/4Ca 早期処理区の1個体に芯止まりが発生し、この個体を実験対象から除いたため、 1/4Ca 早期処理区の個体数は最終的に5個体となった.また、ハウスは最高気温 28℃を目標 に換気を行った.ハウス内の平均日積算日射量と平均気温は、第1果房第1花開花から最 後の未熟果採取までの36日間でそれぞれ7.14 MJ·m⁻²·d⁻¹、22.8℃であった.

(2) 秋作(実験2,低温低日射期)

春作より尻腐れ果発生リスクが低下すると考えられたため,培養液は園試処方,1/4Caに, より低 Ca 濃度の 1/8Ca を加えて3水準とし(第2-1表),1/8Ca 早期処理区を加えて計4処 理区を設け,それぞれ4個体,4個体,8個体,8個体を供試した(第2-1図).2011年9月 29日に播種,10月13日に12 cm ポットに鉢上げした.11月7日に株間20 cmの1条植え で春作と同様に定植し,1列の両端にはボーダー各2個体を置いた.培養液は,園試処方区, 1/4Ca 区および1/8Ca 区では鉢上げ以降定植まで園試処方1/2濃度液を給液し,定植後はそ れぞれ園試処方,1/4Ca,1/8Ca 培養液を給液した.1/8Ca 早期処理区では鉢上げ以降本葉2 葉期に達した10月20日までは園試処方1/2濃度液を給液し,それ以降は標準濃度の1/8Ca 培養液を給液した(第2-1図).

第1果房第1花は定植4日後の11月11日から開花し始めた. 植物体は第3果房の上2 葉を残して摘心した. その他の管理は実験1と同様として,それぞれの花の開花日と初め て尻腐れの症状を認めた日付を記録した.

開花後 21 日を基準に、各果房の果実を実験1と同様に採取した.採取した果実の頂端側 1/2 から Ca を分画抽出し、濃度を定量した.1/8Ca 区の2 個体は、第2 果房の花数が3 花と 少なかったためこれらの個体を実験対象から除いた.ハウス内の気温が 10℃以下にならな いように必要に応じて加温し、最高気温 28℃を目標に換気を行った.ハウス内の平均日積 算日射量と平均気温は、第1 果房第1 花開花から最後の未熟果採取までの46 日間でそれぞ れ 3.64 MJ·m⁻²·d⁻¹、16.1℃であった.

9

2.3 結果

(1) 尻腐れ果発生率

春作および秋作における処理区ごとの,果房を総合した正常果,尻腐れ果および不着果 の割合を第2-2回に示した.果実については,尻腐れの症状が確認された果実は発生後落果 した果実を含めて尻腐れ果,落花を含めて子房の肥大がほとんど認められなかった果実と 尻腐れの発生が確認できる前に落果した果実をまとめて不着果,それら以外の肥大の遅か った果実も含めて子房の直径が1 cm以上に達した果実を正常果として区別した.尻腐れ果 発生率は,不着果を除いた果実中に占める尻腐れ果の割合として算出した.



第2-2 図 培養液中 Ca 濃度が正常果, 尻腐れ果及び不着果の割合に及ぼす影響. 尻腐れ果は落果を含めて尻腐れが確認できた果実, 不着果は尻腐れが確認でき ないで落果した果実および直径が 10 mm 以上に肥大しなかった果実, それら以外 を正常果とした. 正常果, 尻腐れ果および不着果果実それぞれの発生率について処理 区間の異なる文字間には, Tukey の多重比較検定による 5%水準以上の有意差が あることを示す (n=4-8).

春作,秋作ともに園試処方区に比べて Ca 濃度が低い 1/4Ca 区,1/8Ca 区で尻腐れ果発生 率が高くなる傾向があり,秋作に比べて春作でより顕著であったが,果房間には差異が認 められなかった(2元配置分散分析).育苗期間に約半月の間 1/4Ca 培養液を給液し,定植 時から園試処方培養液に戻した回復区と園試処方区との間で尻腐れ果発生率に差は認めら れなかった.春作では Ca 濃度が低い 1/4Ca 区,1/4Ca 早期処理区の全果房で尻腐れ果に加 えて不着果が多く発生し,秋作でも低 Ca 濃度区を中心に上位果房で不着果が多発した.



第2-3 図 果房内果実位置(第1~8果)ごとの尻腐れ果,不着果および正常果の割合 正常果,尻腐れ果および不着果果実それぞれの発生率について果実位置間の異なる文字間には Tukey の多重比較検定による5%水準以上の有意差があること示す.

果房内の着果位置で比較すると、第 2-3 図に示したように、正常果の割合は第 1~5 果に 比べて果房先端部の第 8 果、第 7 果で低かった(P<0.05、Tukey の多重比較検定).特に先 端の第 8 果、第 7 果では春作、秋作とも尻腐れ果よりも不着果の割合が高かったが、低 Ca 濃度区で不着果と判定した果実の中には、がく片に Ca 欠乏によると思われるチップバーン が発生したものも多かった.春作では、基部の第 1 果~第 3 果の尻腐れ果の割合がやや高 くなったが(第 2-3 図)、これは春作の 1/4Ca 区、1/4Ca 早期処理区で果房基部の果実にも多 くの尻腐れ果が発生した結果であり、園試処方区と回復区ではほとんどが正常果であった.

(2) 果実の Ca 濃度

春作および秋作における果房基部果実先端部の Ca 濃度を,水溶性, NaCl 可溶性, HCl 可溶性の3つの画分に区別して第2-4 図に示した.ただし,春作 1/4Ca 早期処理区の第3果 房では Ca 濃度分析に必要な果実が全く採取できず,第2 果房でも3 個未満の果実しか採取 できなかった.春作,秋作ともに園試処方区に比べて 1/4Ca 区, 1/8Ca 区では水溶性と NaCl 可溶性 Ca 濃度が低かった (P<0.05, Tukey の多重比較検定). HCl 可溶性 Ca 濃度は秋作で は低 Ca 濃度区で低かったが,春作では一定の傾向が認められなかった.

水溶性 Ca 濃度は園試処方区,1/4Ca 区ともに秋作に比べて春作で低かった(2 元配置分 散分析,第 2-2 表). NaCl 可溶性 Ca 濃度は,園試処方区では春作が秋作より低かったが, 1/4Ca 区では差がほとんどなかった. HCl 可溶性 Ca 濃度は,園試処方区と低 Ca 濃度区とも に春作と秋作との間で一定の傾向は見られなかった.春作の園試処方区と回復区の間には 各画分の Ca 濃度に差は認められなかった.

同一処理区内の果房間の違いを見てみると,春作の園試処方区と1/4Ca 区で水溶性 Ca 濃度は第3果房が低くなる傾向にあり,秋作の低 Ca 濃度区で水溶性と NaCl 可溶性 Ca 濃度も第3果房で低くなる傾向にあったが,秋作の園試処方区では逆に上位果房で水溶性 Ca と HCl 可溶性 Ca 濃度が高くなった.唯一,すべての果房の先端部の果実について Ca 濃度分析が可能であった春作の園試処方区について果実先端部の全 Ca 濃度を比較すると,第1~3



第2-4 図 処理区別果房ごとの画分別 Ca 濃度

同一画分内の異なる文字間にはTukeyの多重比較検定による5%水準以上の有意差があることを示す.

NA: Not Available. 3 果以上のサンプル果実が採取できなかったことを示す.

第2-2表	第2-4図における処理区	(対照区と1/4Ca区)	間,	作型間に
	おける画分別Ca濃度の有意	意差		

		Ca 濃度		
安米	水溶性	NaCl可溶性	HCl可溶性	Total
処理区 (T)	***	***	**	***
作型 (S)	**	*	NS	*
$T \times S$	NS	NS	NS	NS

NS, *, **, *** はそれぞれ2元配置分散分析による有意差なし, 5%, 1%, および0.1%水準で有意差があることを示す.

果房基部の果実では平均 0.94 mol⋅g⁻¹FW であったのに対して先端部の果実では 0.76 mol・g⁻¹FW と有意に低かった (*P*<0.01, 2 元配置分散分析). また,先端部では尻腐れ果と不着 果の発生率が高く, Ca 分析に適する果実が十分採取できなかった処理区, 果房が多かった.

(3) 尻腐れ果発生率と果実の Ca 濃度との関係

果房基部果実中の各画分のCa濃度とそれぞれの果房全体の尻腐れ果発生率との間の相関 係数を第2-3表に示した.

Ca 画分	春作 (n=11)		秋作 (n=12))	Total (n=23)	
水溶性	-0.884	***	-0.569	NS	-0.625	**
NaCl可溶性	-0.855	**	-0.577	*	-0.486	*
HCl可溶性	-0.071	NS	-0.538	NS	-0.053	NS
Total	-0.745	*	-0.573	NS	-0.429	*

第2-3表 Ca画分ごとの尻腐れ果発生率とCa濃度との間の相関係数

NS, *, **, *** はそれぞれ有意性なし, 5, 1および0.1%水準の有意性があることを示す.

春作では水溶性 Ca 濃度が最も高い相関を示し,NaCl 可溶性 Ca 濃度および全 Ca 濃度と も相関は高かったが,HCl 可溶性 Ca 濃度との間に有意な相関は認められなかった.秋作で は,NaCl 可溶性 Ca 濃度との間に有意な相関が認められたが,相関係数は春作に比べて低か った.春作と秋作を総合した全体での相関では水溶性 Ca 濃度との相関が最も高く,Yoshida ら (2014)の結果と同様に中玉トマトにおいても果実中の水溶性 Ca の濃度が尻腐れ果発生 リスクの有効な指標となり得ることが示唆された.春作と秋作における果実中の水溶性 Ca 濃度と尻腐れ果発生率の関係を第2-5 図に示した.春作では果実中の水溶性 Ca 濃度と尻腐 れ果発生率との間に高い相関が認められたが,秋作では尻腐れ果発生率が大幅に低く,有 意確率が5%よりわずかに大きかった (*P*=0.053).春作,秋作ともに果実中の水溶性 Ca の 濃度が 0.2 mol·g⁻¹FW 以下では尻腐れ果発生率が大きく上昇する傾向にあり(第 2-5 図),
同様な栽培条件で大玉トマトを用いて得られた Yoshida ら(2014)の結果とほぼ一致した.



第2-5図 尻腐れ果発生率と果実中の水溶性 Ca 濃度との関係 処理区別各果房の平均値. *** は 0.1%.水準で有意であることを示す.

2.4 考察

(1) 培養液中 Ca 濃度と栽培季節の違いが尻腐れ果発生率と果実中の水溶性 Ca 濃度に及ぼ

す影響

春作と秋作の間で比較が可能な園試処方区と 1/4Ca 区について見ると, いずれも春作で尻 腐れ果発生率が高く(第2-2 図),水溶性 Ca 濃度は低かった(第2-4 図).大玉トマト・ハウ ス桃太郎øを材料に用いた Yoshida ら(2014)の報告でも,尻腐れ果発生率は,冬作と比較 して,春・夏作が高く,水溶性 Ca 濃度は順に低くなったことが報告されている.同じ園試 処方区で比較すると,中玉トマト÷シンディスイートøを材料とした本研究の春作では水溶性 Ca 濃度が 0.28 mol·g⁻¹FW であったのに対して,Yoshida ら (2014)の報告では同じ 5 月開 花の春作で 0.18 mol·g⁻¹FW 程度と低く,尻腐れ果発生率は本研究の 4.9%に比べて 20%程 度と高かった.1/4Ca 区でも同様な傾向が認められたことから,大玉トマトに比べて中玉ト マトに尻腐れ果が発生しにくい要因の一つは,果実中の水溶性 Ca の濃度が高いことである と考えられた.また,本研究の中玉トマトにおいても Yoshida ら (2014)の大玉トマトと同 様に果実先端部の水溶性 Ca 濃度が 0.2 mol·g⁻¹FW 以下に低下すると尻腐れ果発生率が急激 に上昇したことから (第 2-5 図),この値がトマト果実の尻腐れ果発生が増加し始める閾値 であることが示唆された.

(2) 育苗期の低 Ca 栄養が尻腐れ果発生と果実中の水溶性 Ca 濃度に及ぼす影響

奉作,秋作のいずれにおいても,第1果房の花芽分化開始期頃から低 Ca 濃度培養液を施 用すると,第1 果房の開花直前から施用するよりも早くから尻腐れ果の発生が認められ, 正常果率が低下した(第2-2 図). 尻腐れ果の発生を軽減するためには,育苗期の Ca 栄養に ついても十分配慮することが必要であろう.早期処理区と 1/4Ca 区との間の尻腐れ果発生開 始時期に数日の差があった.早期処理では花芽発育期から比較的長期間にわたって Ca 供給 が抑制されたため,第1果房から果実中の水溶性 Ca 濃度が限界以下に低下するリスクが高 くなったのであろう.その結果,膜構造などの恒常性維持システムが破綻したため,尻腐 れを発症する果実が多発したと考えられた(Ho・White, 2005).回復区と園試処方区との 間では尻腐れ果発生率と果実中の水溶性 Ca 濃度に差異が認められなかったことから,花芽 発育期における 15 日程度の Ca の供給制限では尻腐れ果発生のリスクを高めはするものの, 長期にわたって影響するものではないといえる.つまり,果実中の水溶性 Ca 濃度が 0.2 mol ・g⁻¹FW 以下に低下しない限り,一時的に果実への Ca 供給が抑制されても尻腐れ果発生に及 ぼす影響は小さく,その後の Ca 供給が十分であれば尻腐れ症状の発生には至らないと考え られた.

16

(3) 着果位置が尻腐れ果発生率と果実中の水溶性 Ca 濃度に及ぼす影響

本研究では、低濃度 Ca 培養液の施用時期が第1 果房の尻腐れ果発生率へ影響を及ぼした と考えられたことを除けば、尻腐れ果発生率および果実中の水溶性 Ca 濃度のいずれにおい ても、果房間の差異に一定の傾向は認められなかった(データ省略).ただし、Yoshida ら(2014) の実験においては本研究とは異なり、尻腐れ果発生について、果房間で有意に変化するこ とおよびその季節変動が認められている. Yoshida ら (2014)の報告とは異なり、本研究で はそれぞれの実験期間中の気象条件の変化が小さかったことが影響しているのかもしれな い.しかし、大玉品種と中玉品種で反応が異なる可能性もあり、今後さらに検討する必要 があろう.

一方で、すべての処理区において果房基部に比べて果房先端部で尻腐れ果の発生が多く なる傾向が認められた.特に先端の第8果は尻腐れが発生するか、不着果になる確率が最 も高かった(第2-3図). 尻腐れ果発生時期(開花後日数)も、春作、秋作ともに果房基部 の果実に比べて先端部の果実ほど早くなる傾向にあった(第2-6図).また、低Ca濃度培養 液区では果房先端部果実のがく片にしばしばCa欠乏によると思われるチップバーンが開花 前から発生し、早期落果も多かった(第2-2図).先端部のCa分析が可能であった園試処方 区の果房内では基部に比べて先端部果実の全Ca濃度が有意に低下したことから、果房基部 に比べて先端部の果実へのCa供給が抑制されたと考えられた.しかし、その原因について は明らかではなく、今後検討する必要がある.

17



第2-6図 尻腐れ果の発生時期と果房中の果実位置との関係 * は 5%.水準で有意であることを示す.

(4) 果実の肥大速度が尻腐れ果発生率と果実中の水溶性 Ca 濃度に及ぼす影響

Marcelis・Ho(1999) はパプリカ(*Capsicum annuum* L.)を用いた実験で, 尻腐れ果発生 率と果実の肥大速度との間に正の相関があること報告しており, Ho・White (2005) は,「果 実の細胞肥大において果実の Ca 要求量が果実への Ca 供給量を越えること」が尻腐れの発 生を誘発するとしている.果実の Ca 要求量は果実の肥大速度に密接に関係すると考えられ るため, Ca 濃度を分析した個々の果実の採取時の新鮮重と開花から採取までの日数から求 めた果実の日平均肥大速度(g·d⁻¹)と,果実先端部の水溶性 Ca 濃度との関係を解析した結 果を第 2-7 図に示した. 園試処方区と 1/4Ca 区のいずれにおいても果実の日平均肥大速度と 果実中の水溶性 Ca 濃度との間に明らかな負の相関が認められた.果実肥大の早い春作では 園試処方区においても,果実中の水溶性 Ca 濃度が 0.2 mol·g⁻¹FW 以下まで低下した果実が 相当数存在したことから,果実の肥大速度は尻腐れ果発生リスクを高める重要な要因の一 つであることが確認された.第2-7 図に示した果実肥大速度の平均値は,秋作では園試処方 区,1/4Ca 区ともに 0.23 g·d⁻¹であったのに対し,春作では園試処方区が 0.71 g·d⁻¹,1/4Ca 区が 0.51 g·d⁻¹と約 3 倍であった.この肥大速度の違いが春作で水溶性 Ca 濃度が低く,尻 腐れ果発生率が高かった主要な要因の一つと考えられた.



第2-7図 果実中の水溶性 Ca 濃度と果実肥大速度との関係 *** は 0.1%.水準で有意であることを示す.

著者らがこれまでに行った栽培実験では、尻腐れ果発生数は日によって変動し、集中的 に多発する日の存在がしばしば確認されている(大山・吉田, 2011).本実験でも、春作(実 験1) でその存在が改めて確認された.多発日は,Guichardら(2005) が述べているのと同 様に、晴天で日射が強く、気温や飽差が高くなる日が2、3日連続するような場合に現れや すかった. Guichard ら(2005)は、夏の地中海性気候における昼間の高温、高飽差の環境下 では、午後から夕刻にかけて果実への師部を通じた転流量が増大する一方で、木部を通じ た果実への転流は強く抑制されたが、日没以降は急な上昇に転じたこと、そのような環境 下では、果実の肥大速度が日中に比べて日没以降に高かったことを報告している、本実験 においても尻腐れ果の多発日が現れやすい条件、すなわち日射が強い環境では、日中は光 合成が盛んで, 葉からの蒸散量も大きかったと考えられる. 多量の光合成産物が師部を通 じて流入する結果,肥大に伴う果実の Ca 要求量は増大する.しかし,葉からの蒸散によっ て果実へ Ca を供給する木部導管流が強く抑制されるため、夕刻に向かって果実中の水溶性 Ca 濃度が急激に低下したと推察される.日没後は、葉との間の水分競合が緩和され、水分 が急激に果実に流入し、十分な光合成産物を利用して急速に果実が肥大するのであろう. 木部導管流によってCaの供給は起こるものの細胞肥大に伴う細胞壁合成や拡大する細胞膜 の構造維持のため水溶性 Ca が消費される結果, さらなる Ca 濃度の低下が起こる可能性が 高い.つまり、果実中の水溶性 Ca 濃度が低い状態で果実の急速な肥大が起こり、結果とし て果実肥大の過程でCa不足による膜構造などの生理的破綻が生じるリスクが高まるものと 考えられた.

2.5 摘 要

大玉の普通トマト品種と比較して, 尻腐れ果が発生しにくい中玉トマト÷シンディスイートøを用いて栽培季節と低 Ca 栄養が尻腐れ果発生と果実中の水溶性 Ca 濃度に及ぼす影響を 調査した.春作,秋作ともに園試処方区に比べて低 Ca 濃度の培養液を施用した, 1/4Ca 区, 1/8Ca 区で尻腐れ果発生率が高く,秋作に比べて春作でより高かった.果実先端部の水溶性 Ca 濃度と尻腐れ果発生率との間で有意な負の相関が認められ,果実先端部の水溶性 Ca 濃度 は秋作に比べて春作では大幅に低かった.果実先端部の水溶性 Ca 濃度が 0.2 mol·g⁻¹FW 以 下になると尻腐れ果の発生が急増したが,この値は著者らが大玉トマト'ハウス桃太郎' を用いて行った以前の実験で得られた値とほぼ同じであった.秋作に比べて気温が高く日 射も強い春作では果実の肥大速度が約3倍であった.果実の肥大速度と果実先端部の水溶 性 Ca 濃度との間に有意な負の相関が認められたことから,果実が活発に肥大する条件下で は,果実の Ca 要求が増加すると同時に希釈効果によって果実先端部の水溶性 Ca 濃度が低 下して尻腐れ果発生への感受性が高くなると考えられた.

第3章 補光による明期延長が中玉トマトの尻腐れ果発生および果実中の

Ca 濃度に及ぼす影響

3.1 緒 言

尻腐れの発生要因を理解するうえで、果実中の水溶性 Ca 濃度の動態を把握することは1つのキーポイントと考えられる.根から吸収された Ca のほとんどは木部導管を流れる蒸散流によって植物体地上部に移行し、一度蓄積された Ca は再移動しにくいとされている.トマト果実にも木部導管流によって Ca が供給される.しかし、果実からの蒸散量は少ないため、葉からの蒸散が盛んな日中は葉との競合により果実への木部導管流は抑制される傾向にある.

作型との関係では、尻腐れは気温・日長・日射量が上昇する晩春から夏に多発する傾 向にある(Ho ら, 1993; Yoshida ら, 2014).気温の上昇と日射量の増加は果実の肥大 を促進し(Ho ら, 1993; Pearce ら, 1993a, b; 宇井・高野, 1995a),果実の Ca 要求量 を増大させる.一方,気温の上昇と日射量の増加はいずれも葉の気孔コンダクタンスを 上昇させるので(稲田ら, 2010),日中は葉からの蒸散量が増加する.その結果,果実 への木部導管流が減少して果実への Ca 供給が抑制される.著者らが行ってきたこれま での実験でもこの時期に尻腐れの多発部位である果実先端部の水溶性 Ca 濃度が低下し, 尻腐れ果発生率が高くなることが確認されている(大山ら, 2016; Yoshida ら, 2014). また,長日条件下では葉からの蒸散が長時間継続し,果実への Ca 供給が抑制される状 態がより長く続く.同時に暗期が短くなり,根圧による木部導管を通じた物質の移動が 制限されると考えられる.つまり晩春から夏の作型では長日条件も「果実の Ca 要求量 に,果実への Ca 供給量が追い付かない」状態に陥るリスクを高める条件の1つと考え られる.

そこで、本実験では短日の秋冬期にメタルハライドランプを用いて、光周性だけでは

22

なく,植物体の水分生理にも影響を及ぼすように光補償点を上回る光強度で日没前後から6時間の補光を行い,明期を春夏期と同程度まで延長した.これにより果実の着果・肥大期における約16時間の長日条件が低Ca培養液で育てたトマト果実中のCa濃度と 尻腐れの発生に及ぼす影響を調査した.

3.2 材料および方法

実験は 2011, 2012, 2013 年の秋作各 1 回の合計 3 回行った.中玉トマト 'シンデ ィスイート'((株) サカタのタネ)を供試し,岡山大学の間口 6 m,奥行 19 m,軒高 3 mの南北棟プラスチックハウス内で行った.栽培はすべて,600 mLの培地(イチゴ育 苗培養土,住化農業資材(株))を満たした 12 cm黒ポリポットを用いた根域制限の養 液栽培で行った.培養液施用は日射比例制御として点滴ドリッパーを用い,排液を再利 用しないかけ流し方式とし,排液率が約 10%となるように基準日射量と一回当たりの 給液量を調節した(吉田ら,2007).培養液は第 2 章の実験と同様 Hoagland 処方

(Hoagland・Arnon, 1950)の微量要素を加えた園試処方培養液を基準として, Ca/K 比のみを変更した2水準の低Ca濃度培養液(1/4Ca, 1/8Ca)を各実験で選択,施用した. なお,園試処方培養液を施用する中玉トマトの秋作では,これまでの実験において,尻腐れ果の発生がほとんど認められなかった(大山ら, 2016).本研究においても園試処方培養液を施用する区を設けたが,尻腐れが発生しなかったので結果から除外した.

補光を行わない非補光区はハウス北半分の中央に設置した地上高75 cmの架台1列(5 m)を用いた.補光区は非補光区の末端から3m離して非補光区の南の延長線方向に設 置したハウス中央部の別の架台1列(5m)を用いた.補光には反射型400Wメタルハ ライドランプ(DR400/TL,東芝ライテック(株))2灯を用い,補光区架台の南側末端 部の植物体上方に設置した.ランプは架台の列方向に45~80 cm間隔(実験ごとに調整) でセットし,補光が草冠で所定の強度(実験ごとに設定)となるように,植物体の成長 に応じてランプと植物体との間隔を調整した.補光区の暗期が7~8時間となるように 補光実験中は毎日ランプを17時から23時まで点灯した.また補光が非補光区に影響を 及ぼさないように補光区の北側末端に遮光スクリーンを設置した.

ポットは株間20cmの1条植えで非補光区,補光区それぞれを上述の架台にセット(定 植)し,左右交互に条間50cmで振り分けて誘引した.非補光区,補光区とも1列の 両端にはボーダー各2個体を置いた.実験中はハウス内の気温が10℃以下にならない ように必要に応じて加温し,最高気温28℃を目標に換気を行った.



第3-1図 培養液および補光処理の概要

1/2STD: 1/2 濃度園試処方標準培養液 1/8Ca(L): 1/8Ca 補光区, 1/8Ca(E): 1/8Ca 早期処理区 1/8Ca(E+L): 1/8Ca 早期処理・補光区 1/4Ca(Lw): 1/4Ca 弱補光区, 1/4Ca(L): 1/4Ca 補光区



第 3-2 図 補光区における補光(実験 2-1) 400 Wメタルハライドランプ2灯を補光期中 毎日 17:00 から 23:00 まで点灯.

3.2.1 実験1(2011年秋作)

低温低日射期で尻腐れ果発生リスクが低いと考えられたため、1/8Ca 培養液を用いた. 処理区は、1/8Ca 区、1/8Ca 早期処理区、および補光を行う 1/8Ca 補光区、1/8Ca 早期処 理補光区の4処理区とし(第3-1図)、それぞれ8個体、8個体、4個体、4個体を供試 した.2011年9月29日に播種、10月13日に12 cm ポットに鉢上げし、11月7日に定 植した.培養液は、1/8Ca 区では鉢上げ以降、定植まで園試処方 1/2 濃度液を給液し、 定植後は標準濃度の 1/8Ca 培養液を給液した.1/8Ca 早期処理区では鉢上げ以降本葉2 葉期に達した 10月20日までは園試処方 1/2 濃度液を給液し、それ以降は標準濃度の 1/8Ca 培養液を給液した(第3-1図). 第1果房第1花は定植4日後の11月11日から開花し始めた.植物体は第3果房の上2葉を残して摘心し,各果房第3花開花時にトマトトーン(4-CPA,日産化学工業(株)) 100 倍液を処理し,8花を残して摘花した.それぞれの花の開花日を記録し,果房に果 実が存在する期間は,毎日正午頃に各果実の尻腐れ症状の発現の有無をチェックし,初 めて尻腐れの症状を認めた日付を記録した.

補光強度(PPFD)は補光区の植物体の草冠で60~80 molom⁻²G⁻¹の範囲でできるだけ 均等になるように植物体の成長に応じてランプと植物体との間隔を調整した.補光を第 1 果房先端部の開花がほぼ終了した 11 月 25 日に開始し,実験終了まで毎日行った(第 3-1 図).

開花 21 日後を基準に、Ca 濃度分析に十分な量の試料を確保可能な果実重3gを目安 として Ca 分析用の果実を採取した.各果房の第1果から順に第4果までの範囲で採取 可能な1果と、第8果から順に第5果までの範囲で採取可能な1果とを採取し、これら 2 果をその果房の Ca 分析用果実とした.採取した果実はがくおよび果柄を除去して全 果実重を測定した後、赤道面で切断した.頂端側1/2を厚さ1~2mmにスライスした後、 重量を記録し、15mLの遠沈管に入れた10mLの99%エタノールに浸漬して、4℃で貯 蔵した.1日以上貯蔵した後、Yoshidaら(2014)の手順に従って水溶性、NaCl可溶性、 HCl可溶性の3つに分画して順に Ca を抽出し、原子吸光分光光度計(SPCA-6210、(株) 島津製作所)により Ca 濃度を定量した.1/8Ca 区の2個体は、第2果房の花数が3花 と少なかったためこれらの個体を実験対象から除いた.

ハウス内の平均日積算日射量と平均気温は,第1果房第1花開花から最後の未熟果採 取までの46日間でそれぞれ3.64 MJ·m²·d⁻¹, 16.1℃であった.

3.2.2 実験2

実験1では補光の強度をほぼ一定としたが、実験2では補光を傾斜強度とし、弱補光 が果実中のCa濃度と尻腐れ果発生率に及ぼす影響の調査を含めることとした.また、 実験1では1/8Ca 濃度の補光区で尻腐れ果や不着果が多発し, Ca 濃度測定に適した果 実の収集に支障をきたす場合があったので,実験2では培養液を1/8Caから1/4Caに変 更した.実験2は2012年秋作,2013年秋作の2反復を行い,特に2012年は補光が葉 からの蒸散に与える影響を調べるため,補光環境下で気孔コンダクタンスの測定を行っ た.

(1) 実験 2-1 (2012 年秋作)

2012年9月7日に播種,9月20日に12 cm ポットに鉢上げ,10月11日に定植した. 培養液は,鉢上げ以降定植まで園試処方1/2濃度液を給液し,定植後は1/4Ca 培養液を 給液した(第3-1図).補光を行わない1/4Ca 区に6個体を,補光を行う1/4Ca 区には 18個体を供試し,400Wメタルハライドランプ2灯を架台の列方向に45 cm間隔で南か ら4個体目と6個体目の植物体上方に設置した.18個体のうち草冠での補光強度が強 い5個体を1/4Ca 補光区,弱い5個体を1/4Ca 弱補光区として10月20日に補光処理を 開始した.1/4Ca 補光区の草冠での補光強度は76~168 molcm⁻²c⁻¹の範囲であり,1/4Ca 弱補光区では0.6~4.8 molcm⁻²c⁻¹の範囲であった.

第1果房第1花は定植7日後の10月18日から開花し始めた. 摘心などの管理はすべ て実験1と同様に行った. 補光は第1果房第1花の開花が始まった2日後の10月20日 から毎日17時から23時まで行い,実験が終了するまで継続した(第3-1図,第3-2図). 開花後20日を基準に実験1と同様な方法でCa分析用の果実を採取し,Caを分画・抽 出し,定量した.

補光強度と葉からの蒸散速度の関係を調査するため、リーフポロメーター(SC-1, Decagon Devices Inc., WA, USA)を用いて葉の気孔コンダクタンスを測定した.測定は、 第1果房のCa分析用果実の採取が始まる時期の11月9日の日没後、1/4Ca補光区と1/4Ca 区で行った.1/4Ca補光区2個体の第2果房と第3果房間の葉の異なる合計9枚の小葉、 および1/4Ca区1個体の第2果房と第3果房間の葉の異なる合計3枚の小葉それぞれに おける気孔コンダクタンスと補光強度を記録した. 測定時のハウス内気温と飽差はそれ ぞれ 12.5~14℃, 0.13~0.17 kPa の範囲内であった. 実験期間中のハウス内の平均日積 算日射量と平均気温は, データ収集システムの故障により計算できなかった.

(2) 実験 2-2 (2013 年秋作)

実験 2-1 と同様に補光を行わない 1/4Ca 区,補光を行う 1/4Ca 区を設け,それぞれ 5 個体と 18 個体を供試した.補光処理区のうち草冠での補光強度が 80~120 molom⁻² g⁻¹ の範囲であった 6 個体を 1/4Ca 補光区, 1.0~10 molom⁻² g⁻¹ の範囲であった 4 個体を 1/4Ca 弱補光区として 10 月 29 日に補光処理を開始した.

2013 年 9 月 17 日に播種, 10 月 2 日に 12 cm ポットに鉢上げ, 10 月 25 日に定植した. その他の管理は実験 2-1 と同様とした(第 3-1 図).

第1果房第1花は定植8日後の11月2日から開花し始めた. 補光は第1果房第1花 の開花が始まる4日前の10月29日から毎日17時から23時まで行い,実験が終了する まで継続した(第3-1図). 開花後20日を基準に実験1と同様な方法でCa分析用の果 実を採取し,Caを分画・抽出し,定量した. ハウス内の平均日積算日射量と平均気温 は,第1果房第1花開花から最後の未熟果採取までの48日間でそれぞれ3.22 MJ·m⁻²·d⁻¹, 16.7℃であった.

3.3 結果

実験2については, 尻腐れ果発生率が実験2-2でわずかに高かったものの年次間には ほとんど差が認められなかったので,2年分の結果を合わせて示した.

(1) 尻腐れ果発生率

実験1および実験2(実験2-1と実験2-2の統合結果)における処理区ごとの,正常 果,尻腐れ果および不着果の割合(3果房の合計)を第3-3図に示した.尻腐れの症状 が確認された果実は発生後落果した果実を含めて尻腐れ果とした.落花,子房の肥大が ほとんど認められなかった果実および尻腐れの発生が確認できる前に落果した果実を まとめて不着果とし、それら以外の果実を正常果として分類した.









実験2は実験2-1と実験2-2を総合した結果. 尻腐れ果は落果を含めて尻腐れ が確認できた果実,不着果は尻腐れが確認できないで落果した果実および直径 が10 mm以上に肥大しなかった果実,それら以外を正常果とした. 正常果,尻 腐れ果および不着果果実それぞれの発生率について処理区間の異なる文字間に は, Tukeyの多重比較検定による5%水準以上の有意差があることを示す. 低 Ca 濃度培養液を施肥した実験 1 の 1/8Ca 区,実験 2 の 1/4Ca 区とも多数の尻腐れ 果と不着果が発生し,定植前の育苗期間に約半月の間 1/8Ca 培養液を施肥した実験 1 の 早期処理区(E)ではさらに発生が多かった.実験 2 に比べて培養液の Ca 濃度が園試 処方の 1/8 と低かった実験 1 では不着果が特に多く,発生割合は尻腐れ果と同程度であ った.補光を行わなかった実験 1 の 1/8Ca 区,1/8Ca 早期処理区,および実験 2 の 1/4Ca 区とそれぞれに補光を行った処理区とを比較すると,いずれも補光区で尻腐れ果の割合 が高く,正常果の割合は低かった(P<0.05, Tukeyの多重比較検定).しかし,補光が 弱かった実験 2 の 1/4Ca 弱補光区(Lw)と補光を行わなかった 1/4Ca 区との間に尻腐れ 果の割合,正常果の割合に有意差は認められなかった(第 3-3 図).

果房間で比較すると,実験1,2のいずれにおいても第1果房に比べて上位果房では 尻腐れ果発生率が高くなる傾向にあり,不着果率が高く正常果率が低かった.それらの 差は実験1の尻腐れ果発生率を除いていずれも有意であった(3元配置分散分析,デー タ省略).ただし,正常果率,不着果率はそれぞれ開花した全花数に対する正常果,不 着果の割合,尻腐れ果発生率は全花数から不着果数を除いた果実数に対する尻腐れ果の 割合として算出した.

(2) 果実の Ca 濃度

実験1における果実先端部の水溶性 Ca 濃度と全 Ca 濃度を第3-1表に,実験2における濃度(実験2-1と実験2-2の平均値)を第3-2表に示した.ただし,全Ca 濃度は水溶性, NaCl 可溶性, HCl 可溶性 Ca 濃度の総和である.

実験1における水溶性 Ca 濃度と全 Ca 濃度は,第1 果房では早期処理(E)により低下したが(P<0.05, Tukey の多重比較検定),補光(L)の影響は認められなかった. 第2 果房,第3 果房では水溶性 Ca 濃度,全 Ca 濃度ともに早期処理と補光により低下し,第1 果房,第2 果房に比べて第3 果房の Ca 濃度が低下する傾向にあった. Tukeyの多重比較検定では個々の値の間に有意差は確認できなかったが(P>0.05),3 元配置

	7	×溶性 Ca				4	全 Ca		
処理区		果房				:	果房		JI II
	1 st	2nd	3rd	平均	1st		2nd	3rd	平均
1/8Ca	0.242 a ^z	0.229 a	0.138 a	0.211 a	0.551 a	a	0.502 a	0.325 a	0.476 a
1/8Ca (L)	0.247 a	0.181 ab	0.099 a	0.180 ab	0.533	a	0.408 ab	0.272 a	0.412 ab
1/8Ca (E)	0.194 b	0.192 ab	0.129 a	0.179 b	0.403	b	0.436 ab	0.301 a	0.392 bc
1/8Ca (E+L)	0.195 b	0.138 b	0.082 a	0.157 b	0.368	b	0.328 b	0.233 a	0.331 c
平均	0.217 A	0.190 B	0.115 C	0.183	0.457	A	0.428 A	0.288 B	0.406
有意性									
補光 (L)		**					**		
早期処理(E)		**					**		
果房(I)		**					**		

第3-1表 果実中の水溶性Ca濃度と全Ca濃度 (molog⁻¹FW,実験1)

² 同列内の異なる小文字間,果房の平均値に付した異なる大文字間にはTukeyの多重比較検定による5%水準以上の有意差があることを示す. ** は3次元配置分散分析による1%水準以上の有意差があることを示す.相互作用は補光と果房間(L×I),早期処理と果房間(E×I)の5%水準の有意差を除いて認められなかった.

	;	水溶性Ca				全Ca		
処理区		果房				果房		TT HA
	1st	2nd	3rd	平均	1st	2nd	3rd	平均
1/4Ca	0.245 a ^z	0.213 a	0.242 a	0.234 a	0.622 a	0.513 a	0.539 a	0.565 a
1/4Ca (Lw) ^y	0.241 a	0.210 ab	0.169 ab	0.216 a	0.599 a	0.494 a	0.469 ab	0.536 a
1/4Ca (L)	0.183 b	0.162 b	0.151 b	0.167 b	0.456 b	0.396 b	0.350 b	0.406 b
平均	0.222 A	0.193 B	0.188 B	0.204	0.557 A	0.464 B	0.444 B	0.497
有意性								
年度 (Y)		NS				NS		
処理(T)		**				**		
果房(I)		*				**		

第3-2表 果実中の水溶性Ca濃度と全Ca濃度(molog⁻¹FW,実験2-1と実験2-2の平均値)

² 同列内の異なる小文字間,果房の平均値に付した異なる大文字間にはTukeyの多重比較検定による5%水準以上の有意差があることを示す.

^y (Lw)は弱補光(草冠でのPPFD: 0.6~10 molom²o⁻¹)を示す.

NS,*,**はそれぞれ3元配置分散分析により有意差無し,5%水準,1%水準での有意差があることを示す.

処理と果房間(1%水準の有意差あり)を除いて有意な相互作用はなかった.

分散分析では早期処理の有無,補光の有無,果房間に有意差が認められた(第3-1表). 実験2では,水溶性Ca濃度,全Ca濃度はいずれも全果房で補光(L)により低くなった(P<0.05,Tukeyの多重比較検定).しかし1/4Ca弱補光区(Lw)と1/4Ca区との間ではいずれの画分においても有意差は見られなかった.果房間では水溶性Ca濃度,全Ca濃度はともに第1果房に比べて上位果房で低下する傾向にあった.3元配置分散分析を行った結果,処理区間と果房間のいずれにも有意差が認められたが,年次間に有意差はなかった(第3-2表).

(3) 尻腐れ果発生率と果実の水溶性 Ca 濃度との関係

実験1と実験2のすべての処理区における果房ごとの尻腐れ果発生率,正常果率と果 実先端部の水溶性 Ca 濃度平均値との関係を併せて第 3-4 図に示した. 尻腐れ果発生率 と果実の水溶性 Ca 濃度との間には負の相関が,正常果率と果実の水溶性 Ca 濃度との 間には正の相関が認められた(いずれも0.1%水準で有意).水溶性 Ca 濃度が0.2 mol ·g⁻¹FW 以上の果房では尻腐れ果発生率は20%以下,正常果率は76%以上であったが, 0.2 mol·g⁻¹FW 以下に低下するとバラツキは大きかったものの,尻腐れ果発生率が急激 に高くなり,正常果率が大幅に低下する果房が多くなった.



◆ 尻腐れ果 (n=21) ○正常果 (n=21)

第 3-4 図 尻腐れ果の割合,正常果の割合と果実中の水溶性 Ca 濃度 との関係

実験1および実験2(実験2-1と実験2-2の平均値)における各果房の平均値. *** は0.1%水準の有意性があることを示す.

(4) 補光強度と果実の Ca 濃度, および葉の気孔コンダクタンスとの関係

実験 2-1 における補光強度と果実の水溶性 Ca 濃度,および全 Ca 濃度との関係を第 3-5 図に示した.



第 3-5 図 補光強度と果実中の Ca 濃度との関係 補光強度は草冠での値. Ca 濃度はそれぞれの植物体の 3 果房の平均値. ***, * はそれぞれ 0.1%, 5%水準で 有意であることを示す.

補光強度は草冠での値, Ca 濃度はその植物体の第 1~3 果房の平均値であり, 測定は 1/4Ca 補光区の5個体, 1/4Ca 弱補光区の5個体について行った.水溶性 Ca 濃度,全 Ca 濃度はいずれも補光強度との間に負の相関が認められ,決定係数は全 Ca 濃度との 間でより大きかった. 実験 2-1 で調査した補光強度と葉の気孔コンダクタンスの関係を第 3-6 図に示した. 非補光の 1/4Ca 区に比べて,補光区では補光強度が増すに従って気孔コンダクタンス も大きくなり,補光強度と葉の気孔コンダクタンスとの間に正の相関が確認された.



第3-6図補光強度と葉の気孔コンダクタンスとの関係(実験 2-1, n=12) 測定中の VPD 値と気温はそれぞれ 0.13 kPa ~0.17 kPa, 12.5 ~14 の範囲であった. *** は 0.1%水準で有意であることを示す...

3.4 考察

実験1,2ともに非補光区に比べて補光(L)区で尻腐れ果発生率が高く,正常果率は低くなったが,実験2の弱補光(Lw)区と非補光区との間では尻腐れ果発生率,正常 果率ともに有意差は認められなかった(第3-3図).実験1では第1果房を除いて果実 中の水溶性Ca濃度と全Ca濃度は非補光区に比べて補光区で低かったが,実験2の弱 補光区と非補光区の間ではいずれも有意差は認められなかった(第3-1表,第3-2表). 実験1の第1果房で果実中の水溶性 Ca 濃度,全 Ca 濃度ともに非補光区と補光区の間 でほとんど差異が認められなかったのは補光の開始が遅れたため, 第1果房の果実への 影響が限定的であったと考えられた. 果実中の Ca 濃度, 特に水溶性 Ca 濃度と尻腐れ 果発生率との間に負の相関が存在することはこれまでにも報告があり(寺林ら, 1988), 著者らもこれまでの実験で確認している(大山ら, 2016; 吉田ら, 2012; Yoshida ら, 2014). 今回の実験においても, 第3-4 図に示したように, 果実中の水溶性 Ca 濃度と尻 腐れ果発生率の間には負の相関が認められ,果実中の水溶性 Ca 濃度が 0.2 mol・g⁻¹FW 程度以下になると尻腐れの発生が急増することも著者らのこれまでの実験(大山ら, 2016; Yoshida ら, 2014) と一致した. 尻腐れ果発生率に比べて正常果率の決定係数 (R²) がやや大きかった. 不着果に分類した果実にはがく片に著しいチップバーンが発生し, 落花や子房が肥大する前に落果した果実も多かったことから、Ca 欠乏が不着果の主要 因であり、これらの果実は尻腐れ果になり得なかった極度の Ca 不足状態にあった可能 性が高い.これら潜在的尻腐れ果の存在を想定すれば、本実験では尻腐れ果の発生リス クは不着果に分類した果実を除いて算出した発生率よりすべての果実をもとに算出し た正常果率に正確に反映された可能性が高く,補光による明期延長は,果実中の水溶性 Ca 濃度を低下させ、尻腐れ果の発生確率を高めたと考えられる.

第2章で述べたとおり、果実の肥大速度は果実のCa要求量に直接関係すると考えられることから、Ca濃度を分析した個々の果実の採取時の新鮮重と開花から採取までの日数から果実の日平均肥大速度(g・d⁻¹)を求め、全果房平均値を補光区と非補光区で比較した. その結果、実験1では1/8Ca非補光区0.226g・d⁻¹に対して1/8Ca補光区0.253g・d⁻¹、1/8Ca 早期非補光区0.240g・d⁻¹に対して1/8Ca早期補光区0.235g・d⁻¹、実験2では1/4Ca非補 光区0.258g・d⁻¹に対して1/4Ca補光区0.264g・d⁻¹であり、実験1、2ともに非補光区と 補光区間で果実肥大速度に有意差は認められなかった(t検定、P>0.24)、光照射強度 の増加が果実の肥大速度を高めるとする報告があるが(Pearce ら、1993b)、本実験では 着果数を果房当たり8果に制限しており、補光強度(60~168 mol·m⁻²œ⁻¹)が同時期の 実験ハウス内の自然光強度(680~1100 mol·m⁻²œ⁻¹,日中晴天時)に比べて1/8程度と 弱かったことから、果実の肥大への影響はわずかであったと推測できる.これらの結果 を「果実のCa要求と果実へのCa供給」の観点から見てみると、本実験で補光区の尻 腐れ果発生率が高まったのは、果実のCa要求が高まったことよりも、果実へのCa供 給が抑制されたことが主たる要因と考えられた.

稲田ら (2010) はトマトの葉において気孔コンダクタンスを測定し、光合成有効光量 子東密度 (PPFD) に対しては、400 mol·m⁻²G⁻¹ 以下の低い領域では気温や飽差の影響 が大きくなるものの概ね正の相関関係にあることを報告している.光以外の要因がほぼ 等しい条件で測定した本実験では、第 3-6 図に示したように補光の強度 (PPFD) が 200 mol·m⁻²G⁻¹ 以下の低い領域においても葉の気孔コンダクタンスとの間に正の相関関係 が確認された.弱い光にも気孔が応答して開口することはこれまでにも知られており (Kinoshita ら, 2001)、本実験でも補光の強度 (PPFD) が 50 mol·m⁻²G⁻¹以下の弱い領 域でも気孔が開口し、気孔コンダクタンスが上昇したと考えられる.気孔コンダクタン スと蒸散量との間には正の相関があることが報告されており (稲田ら、2010)、補光区 では明期延長期間中の約 6 時間にわたって非補光区に比べて葉からの蒸散が高まった と推察される.また、明期の延長は暗期が短くなることを意味しており、結果的に根圧 によって木部を通じて Ca が果実に流入する時間が 6 時間減少したことになる.これら

2 つの要因により,補光区では補光強度に応じて果実への木部導管流が抑制され, Ca の転流量が減少したと考えられる(第3-1表,第3-2表,第3-5図).

Guichard ら (2005) は, 夏の地中海性気候における昼間の高温, 高飽差の環境下では, 午後から夕刻にかけて果実への師部を通じた転流量が増大する一方で, 木部を通じた果 実への転流は強く抑制されること, 日没以降は急な上昇に転じたこと, そのような環境 下では, 果実の肥大速度が日中に比べて日没以降に高かったことを報告している. 尻腐

38

れ果発生のリスクが高い晩春から夏の作型では高温,長日条件にあり,晴天時には強日 射,高飽差環境下での栽培となる.日射量の増加と高温は果実の肥大速度を高めるので 果実の Ca 要求量が増加する.一方,このような気象環境下では日中の葉からの蒸散が 盛んで,葉からの蒸散流との競合のため果実への木部導管流が抑制される.これらの条 件が重なる結果,果実への Ca 供給が低下する状態が長時間継続して果実中の水溶性 Ca が消費されるため,濃度が極度に低下すると推察された.

本実験の補光により延長した明期中は、晩春から盛夏期の明期と異なり、気温・飽差 ともに低く(第3-6図)、補光強度と気孔コンダクタンスも晴天日の日中に比べて小さ かった.それにもかかわらず、補光区では非補光区に比べて、果実中の水溶性 Ca 濃度 と全 Ca 濃度が低く、尻腐れ果発生率は有意に高くなった.以上のことから、晩春から 盛夏期には、高温と強日射による果実肥大速度の上昇と Ca 要求量増大に加えて、長い 明期も木部導管流による果実への Ca 転流を抑制して尻腐れ果発生率を高める大きな要 因の1つと考えられる.

3.5 摘 要

秋作において補光で明期を約 16 時間に延長することにより長日条件がトマト果実中 の水溶性 Ca 濃度と尻腐れの発生に及ぼす影響を調査した.中玉トマト 'シンディスイ ート'を用い,園試処方の Ca/K 比のみを変更した低 Ca 濃度 (1/4Ca, 1/8Ca) 培養液を 給液した.400 W メタルハライドランプ 2 灯により草冠で 60~168 mol·m² G⁻¹ (PPFD) の範囲で補光を行った結果,非補光区に比べて補光区で尻腐れ果の割合が顕著に増加し, 正常果率は低下した.果実中の水溶性 Ca 濃度と全 Ca 濃度はいずれも補光により低下 した.果実の肥大速度に補光の有無による差異は認められなかったが,葉の気孔コンダ クタンスと補光強度との間には正の相関関係が確認された.つまり,日没後も補光期間 中は葉からの蒸散が継続し,木部導管を通じた果実への Ca 転流が抑制されたと考えら れる.以上のことから,晩春から盛夏期には,高温と強日射による果実肥大速度の上昇 と Ca 要求量増大に加えて短い暗期が木部導管流による果実への Ca 転流を抑制するこ とも尻腐れ果発生率を高める大きな要因の1つと考えられた.

第4章 がくからの蒸散抑制が中玉トマトの尻腐れ果発生と

果実中の Ca 濃度に及ぼす影響

4.1 緒言

果実の肥大に寄与する果実への水分の供給は、師部流と木部導管流によるが、その割 合は師部流が多い(Araki ら、2004; Ieperen ら、2003; 北野ら、2001). しかし、Ca は師管を転流しにくく、主として木部導管流により運ばれることが知られている

(Ehret・Ho, 1986a; Taiz・Zeiger, 2002b; White・Broadley, 2003). したがって, 果実の肥大に伴う果実の Ca 要求を満たして尻腐れの発生を抑制するには,多くの Ca が木部導管流によって果実に供給されなければならない. しかし,果実表面には気孔が わずかしか存在せず (Gillaspy, 1993),果実からの蒸散のほとんどがチクラ蒸散に依存す るため,葉の気孔蒸散に比べれば極めて少量である(北野ら,2001; Nakano・ Ueda,1996). したがって,十分な量の蒸散流を期待することは難しく,特に日中は蒸 散が盛んな葉への蒸散流との競合が強まり,果房に分流し,果実へ流入する木部導管流 量が抑制される. 葉からの蒸散が極めて盛んになる環境下では,果実から流出する逆流 さえ起こり得ることも報告されている(Araki ら, 2004; Guichard ら, 2005; 北野 ら, 2001).

がくは果房内の蒸散器官であって,果実に付着して存在し,果実に比べて組織中の Ca 濃度がはるかに高く(Ehret ら, 1986a),果実に比較して蒸散量が多いことが報告 されている(Araki ら, 2004;北野ら, 2001).がくが尻腐れ果発生や果実中の Ca 濃 度に及ぼす影響に関しては,これまでに,がくの切除はがくを切除した果実の尻腐れ果 発生率を高めたこと(Ehret ら, 1986a, b;大山ら, 2015;宇井ら, 1995b),がくが 果実への Ca 蓄積に寄与している可能性があること(Ehret ら, 1986a)などの報告が なされている.しかし,それらの仕組みについては未だ十分には解明されていない.

そこで、本実験では果実の急速肥大期のがくからの蒸散抑制が、 尻腐れ果発生率と果

実中の Ca 濃度に及ぼす影響を調査した. がくからの蒸散抑制は, がく片をすべて切除 することにより行った. がく片を切除した果実を採取して Ca 分析を行うため, がく片 の切除は開花後数日を経過し, 着果が確認できた時点とし, 着果を確実にして Ca 分析 のための果実をできるだけ多く確保するようにした. また, がく片切除の影響が, がく 片からの蒸散抑制によるものであることを見極めるため, 同時期にすべてのがく片にワ セリンを塗布して, がく片からの蒸散を抑制する処理区を設けた.

4.2 材料および方法

実験は2014年の春に、これまでの実験と同様に中玉トマト÷シンディスイートø((株) サカタのタネ)を供試し、岡山大学の間口6m、奥行19m、軒高3mの南北棟プラスチ ックハウス内で行った. 栽培はすべて、600mLの培地(イチゴ育苗培養土、住化農業 資材(株))を満たした12cm黒ポリポットを用いた根域制限の養液栽培で行った. 培 養液施用は日射比例制御として点滴ドリッパーを用いたかけ流し方式とし、排液率が約 10%となるように基準日射量と一回当たりの給液量を調節した(吉田ら、2007). 培養 液はこれまでの実験と同様 Hoagland 処方(Hoagland・Arnon、1950)の微量要素を加え た園試処方培養液と、Ca/K 比のみを変更した 1/2Ca 濃度の培養液を処理区ごとに選択、 施用した(第2-1表).

園試処方培養液を施用する園試処方区には、がく処理を行わない区、がく片をすべて 切除するがく片切除区、がく片全体にワセリンを塗布するワセリン塗布区の3つの処理 区を設け、それぞれ5個体、6個体、6個体を供試した.1/2Ca濃度の培養液を施用する 1/2Ca区にはがく処理を行わない区、およびがく片切除区の2つの処理区を設け、それ ぞれ5個体、6個体を供試した.各処理区は、ハウス中央部に南北方向に設置した地上 高約75 cmの一列の架台に配置した.

2014 年 3 月 14 日に播種, 3 月 26 日に 12 cm 黒ポリポットに鉢上げし, 鉢上げ後は 1/2 濃度の園試処方培養液を給液した. 第 1 果房第 1 花の開花が始まる 6 日前の 4 月 24

42

日にポットを株間 20 cm の 1 条植えで上述の架台にセット(定植)し,左右交互に条間 50 cm で振り分けて誘引した.架台の両端にはボーダー各 2 個体を置いた.定植後は園 試処方区には園試処方培養液を,1/2Ca 区には 1/2Ca 濃度の培養液を施用し(第 2-1 表), 実験中はハウス内の最高気温 28℃を目標に換気を行った.

第1果房第1花は定植6日後の4月30日から開花を始めた. 植物体は第3果房の上2葉を残して摘心し,各果房は8果を残して摘花した. 各果房は第3花開花時にトマトトーン(4-CPA,日産化学工業(株))100倍液を処理した. それぞれの花の開花日を記録し,果房に果実が存在する期間は毎日正午ごろに各果実の尻腐れ症状の発現の有無を調査し,初めて症状が認められた日付を記録した.

がく片切除処理は,園試処方区および 1/2Ca 区のがく片切除処理を行う区の全個体に 対して行った.がく片の切除は各果房の第1果,第5果の2果を対象として,開花後5 日を基準として着果が確認できた時点ですべてのがく片を基部から切除した(第4-1図). 切除後も,がく片の成長が認められた時点で随時伸長した部分を切除し,常にがく片が 基部から切除された状態を保った.



第4-1 図 がく片切除処理

ワセリンのがく片への塗布は、園試処方区のワセリン塗布区の全個体に対して行った. がく片の切除と同様に、開花後5日を基準に着果が確認できた時点ですべてのがく片の 両面に基部から全面ワセリンを塗布した.塗布後もがく片の生長によりワセリン塗膜が できるだけ破断しないよう随時塗膜を補った.

開花後18日を基準にCa分析用の果実を採取した.採取する果実はCa濃度分析に必

要な量の試料を確保可能な果実重6g以上を目安とし、全処理区の第1果房第1果、第 5 果を対象とした. 採取した果実はがくおよび果柄を除去して全果実重を測定した後、 赤道面で切断した. 頂端側 1/2 と基部側 1/2 それぞれをさらに胎座と隔壁を含む果皮と に分離し、それらを厚さ 1~2 mm にスライスした後、それぞれの重量を記録し、別々 に 15 ml の遠沈管に入れた 10 ml の 99%エタノールに浸漬して、4℃で貯蔵した. 1 日以 上貯蔵した後、Yoshida ら (2014) の手順に従って分離した 4 つの部位から水溶性、 HCl 可溶性の 2 つに分画して順に Ca を抽出し、原子吸光分光光度計(SPCA-6210、(株)島 津製作所)により Ca 濃度を定量した.

なお、第2果房が奇形で果実が4個しか着果しなかった1/2Ca+がく片切除区の1個 体は実験対象から除外し、1/2Ca+がく片切除区の実験対象は5個体とした.また、尻 腐れ果や落果が多発して必要なCa濃度分析用果実が採取できなかった1/2Ca区および 1/2Ca+がく片切除区の第2果房、第3果房はCa濃度と果実肥大速度の調査対象から除 外した.同様に、果実成長のバラツキが大きくCa濃度分析に適した果実が必要数確保 できなかった園試処方区のがく片切除区、ワセリン塗布区の第2果房と第3果房も、が く無処理区の第2果房と第3果房を含めてCa濃度と果実肥大速度の調査対象から除外 した.ただし、これらの区の第2果房と第3果房についても尻腐れ果の調査は継続して 実施した.

ハウス内の平均日積算日射量と平均気温は,第1果房第1花開花から最後の未熟果採 取までの45日間でそれぞれ8.37 MJ·m⁻²·d⁻¹,22.2℃であった.

4.3 結果

(1) 尻腐れ果発生率

がく片切除とワセリン塗布が尻腐れ果発生率に及ぼす影響を評価するため,がくの処理の対象とした各果房の第1果と第5果,及びがくの処理を行わなかった無処理区の第1果と第5果の尻腐れ果発生率を第4-1表に示した. 園試処方区のがく無処理区では尻

腐れ果は発生しなかった.がく片切除区の第2,3果房とワセリン塗布区の第2果房で は尻腐れ果がわずかに発生したが発生率は 10%未満で、がく無処理区との間に有意差 は認められなかった.

低 Ca 濃度培養液を施用した 1/2Ca 区ではがく無処理区の第2 果房と第3 果房,がく 片切除区では全果房で多くの尻腐れ果が発生した.特にがく片切除区の第2果房と第3 果房ではほとんどが尻腐れ果となり、その多くは落果した. 各果房ごと、あるいは全果 房を合わせて比較した場合のいずれにおいてもがく無処理区に比べてがく片切除区の 尻腐れ果発生率が有意に高かった(第4-1表).

	第4−1表 尻/	腐れ果発生	率(%)	
処理	第1果房	第2果房	第3果房	合計
		園試処フ	与区	
無処理	$0^z a^y$	0 a	0 a	0 a
がく片切除	0 a	9.1 a	8.3 a	5.7 a
ワセリン塗布	0 a	8.3 a	0 a	2.9 a
		1/2Ca	X	
無処理	0 b	50 b	20 b	23.3 b
がく片切除	40 a	100 a	90 a	76.7 a

日本は日がルー

× 各果房の第1果と第5果を対象とした尻腐れ果発生率.

y 園試処方区、1/2Ca区それぞれの同一列内の異なるアルファベット間 にはTukeyの多重比較検定による5%水準の有意差があることを示す.

第1果および第5果のがく片切除が,同一果房上のがくを保存した第2~4果,およ び第 6~8 果の尻腐れ果発生に及ぼす影響を評価するため、尻腐れ果が多発した 1/2Ca 区第 2~4 果,および第 6~8 果を対象として,がく無処理区とがく片切除区の第 1~3 果房それぞれの尻腐れ果発生率を第4-2表に示した.がく無処理区に比べてがく片切除 区では第1果房でやや高く,第2,3果房では高くなる傾向にあった.果房個々では有 意差は確認できなかったが,3果房を合わせて比較した場合は処理区間に有意差が確認 された(t検定,P < 0.05).

第4-2表 がく処理が同一果房内のがく無処理果実の尻腐れ果 発生率^z(%)に及ぼす影響(1/2Ca区)

がく処理	第1果房	第2果房	第3果房	合計
無処理	23.3	56.7	33.3	41
	NS	NS	NS	*
がく片切除	30	80	63.3	65.9

² 各果房における第2~4果,第6~8果総合の尻腐れ果発生率 NS,*はがく処理区間にt検定による5%水準の有意差なし,有意差ありを示す.

次に, すべての果房を合わせて果房内の果実の位置ごとに 1/2Ca がく無処理区と 1/2Ca +がく片切除区との尻腐れ果発生率を第4-2 図に示した.がく無処理区において,第1 果,第2果の尻腐れ果はわずかであったが,果房先端に向かって尻腐れ果発生率が高く なり,特に先端部の第7果,第8果は高かった.がく片切除区では,がく無処理区に比 べてすべての果実位置で尻腐れ果発生率が高くなる傾向にあり,特にがく片を切除した 第1果,およびがく無処理果実である第7果,第8果の多くが尻腐れ果となり,もう1 つのがく片切除果実である第5果の尻腐れ果発生率も高かった.これらの中では第1果, 第7果でがく無処理区とがく片切除区の尻腐れ果発生率に有意差が確認された(t検定, P<0.05).



第4-2 図 がく切除処理が果実の果房内各位置における尻腐れ果発生率に及ぼす影響(1/2Ca 区) ***, *, NS はそれぞれ同一果房内位置で,がく片切除の有無による有意差がt 検定により 0.1%, 5%水準であり,5%水準でなしを表す.

(2) 果実中のCa濃度及び果実肥大速度

各処理区の第1果房第1果,第5果の頂端側1/2の果実中の水溶性Ca濃度,全Ca濃度,および果実肥大速度の平均値を第4-3表に示した.濃度は果皮および胎座を総合した値である.園試処方区では、がく片切除およびがく片へのワセリン塗布により水溶性Ca濃度,全Ca濃度がいずれもがく無処理区より有意に低くなった.1/2Ca区でもがく片切除処理により水溶性Ca濃度と全Ca濃度がいずれも有意に低くなった(Tukeyの多重比較検定,P<0.05).一方,果実肥大速度は、園試処方区、1/2Ca区いずれでもがく処理の有無による差異は見られなかった.また、園試処方区におけるがく片切除区とワセリン塗布区の間でも、水溶性Ca濃度,全Ca濃度、果実肥大速度のいずれでも差異は認められなかった.

果実の部位別の Ca 濃度は,水溶性 Ca 濃度,全 Ca 濃度とも頂端側 1/2 に比べて基部 側 1/2 で果皮,胎座ともに高く,明らかな濃度勾配が確認された.濃度勾配には園試処 方区,1/2Ca 区,がく処理の有無による顕著な差異は認められなかった.また,水溶性 Ca 濃度は胎座で高く,全 Ca 濃度は果皮で高くなる傾向がみられた.ただし,Ca 濃度 定量のための胎座の新鮮重が十分確保できない果実が多かったことから,詳細データの 記載は省略した.

第4-3表	果実中のCa濃度(mol·g FW)と果実	[肥大速度(g·d)
がく処理	水溶性Ca ^z	全Ca ^y	果実肥大速度 ^x
		園試処方区	
無処理	0.287	a ^w 1.148	a 0.568 a
がく片切除	0.172	b 0.694	b 0.577 a
ワセリン塗布	0.196	b 0.709	b 0.567 a
		1/2Ca区	
無処理	0.202	a 0.667	a 0.630 a
がく片切除	0.151	b 0.527	b 0.641 a

第4-3表 果実中のCa濃度(mol·g⁻¹FW)と果実肥大速度 (g·d⁻¹)

² 第1果房第1果, 第5果の頂端側1/2の果皮と胎座を総合した平均値.

^y 全Ca濃度は水溶性Ca濃度とHCl可溶性Ca濃度の和. 第1果房第1果, 第5果の頂端側1/2の果皮と胎座を総合した平均値.

× 第1果房第1果と第5果の平均値.

^w 園試処方区,1/2Ca区それぞれの同一列内の異なるアルファベット間には Tukeyの多重比較検定による5%水準の有意差があることを示す.

4.4 考察

(1) がく片切除が切除した果実の尻腐れ果発生率、及び果実中のCa濃度に及ぼす影響 園試処方区ではがく片切除処理,およびがく片へのワセリン塗布処理により上位果房 に少数の尻腐れ果が発生した.一方,低 Ca 濃度の培養液を施用した 1/2Ca 区ではがく 片切除処理により全果房で尻腐れ果の発生が大きく増加し,特に上位果房ではほとんど が尻腐れ果であった(第4-1表).一方,第1果房の頂端側1/2の果実中Ca濃度を見て みると、園試処方区と 1/2Ca 区のいずれでも、がく無処理区に比べて、がく片切除、お よびワセリン塗布(園試処方区のみ)により有意に低下した(第4-3表). 果実の肥大 速度にはがく処理の有無による差異は認められなかったことから、がく処理を行った果 実中の Ca 濃度低下の主要因は、果実の Ca 要求の増加ではなく、果実への Ca 供給が抑 制された結果と考えられた. 園試処方区ではがく片切除, およびワセリン塗布により果 実中の水溶性Ca濃度が0.171 molg⁻¹FW(がく片切除区)まで低下したにもかかわらず, いずれの区でも第1果房には尻腐れ果が発生しなかった.しかし、1/2Ca 区では、がく 無処理区の第1果房の水溶性 Ca 濃度は 0.202 molg⁻¹FW で尻腐れ果の発生は認められ なかったのに対し,がく片切除区では 0.151 molg⁻¹FW に低下し,40%の果実に尻腐れ が発生した.これらのことから、本実験でも尻腐れ果発生の増加が始まる果実中の水溶 性 Ca 濃度が 0.15 から 0.17 molog⁻¹FW の間に存在したと推測された. がくは果実への Ca 供給に貢献していると考えられるが、ワセリン塗布とがく片切除は尻腐れ果発生率 と果実中の Ca 濃度に同様の影響を及ぼしたことから,がくからの蒸散がその役割を担 っている可能性が高いと考えられた.

(2) がく片切除が同一果房内のがく無処理果実の尻腐れ果発生率に及ぼす影響

1/2Ca+がく片切除区では、がく片が切除された第1果、第5果を除いた他の6果の 尻腐れ果発生率は、8果すべてのがく片が保存された1/2Caがく無処理区の同位置の6 果に比べて高くなる傾向にあり、すべての果房を合わせた BER 発生率の差は有意であ ることが確認された(第4-2表). さらに, 1/2Ca 区で果房内の果実の位置ごとの尻腐れ 果発生率をがく無処理区とがく片切除区で比較してみると,がく片切除果実だけでなく, がく片が保存された他の 6 果すべての果実でがく片切除区の果実の尻腐れ果発生率が 高くなる傾向にあり,第7果では有意差が確認された(第4-2図). これらのことは,が く片切除は,その果実の Ca 供給に大きく影響を及ぼしただけではなく,同一果房内の 他の果実への Ca 供給にも少なからず影響を及ぼしたことを示している.

本実験の 1/2Ca 区では、がく片切除により尻腐れ果発生率が顕著に高くなり、Ehret ら(1986a, b)、宇井ら(1995)の結果と一致した.果実中のCa 濃度に関しては、サン プリング果実の採取時期や条件が異なるので単純には比較できないが、宇井ら(1995b) は乾物中の全Ca 濃度ががく片切除によって低下したと報告している.一方、本実験で は園試処方区、1/2Ca 区ともに、がく片切除、およびワセリン塗布(園試処方区のみ) により正常果でも水溶性Ca 濃度、全Ca 濃度のいずれもが有意に低下した.また、果 実のCa 含有量にも有意の差が認められたことから(データ省略)、がくからの蒸散抑制 が果実へ流入するCa を減少させた可能性が高い.

がくからの蒸散を抑制した果実では,果床部への Ca 供給が抑制された結果,果実へ 流入する Ca も減少したのであろう. さらに,果房内蒸散器官としてのがく片の面積の 減少により茎から果房に分流する木部導管流が減少した結果,Ca に対する果房内での 競合が厳しくなったと考えられる.しかし,がくからの蒸散が果実への Ca 供給に影響 を及ぼす仕組みは未だ明確にはされておらず,それらを解き明かすには今後さらに詳細 な調査が必要であろう.

4.5 摘要

果実の急速肥大期のがくからの蒸散抑制が尻腐れ果発生率および果実中の Ca 濃度に 及ぼす影響を調査した.中玉トマト 'シンディスイート'を用い,園試処方標準と Ca/K 比のみを変更した 1/2Ca 濃度培養液を施用した.がくからの蒸散抑制の影響を調べるた め、各果房全8果のうち第1果と第5果のがく片を、開花後5日を基準に着果が確認で きた時点ですべて切除する区(園試処方区,1/2Ca区),がく片にワセリンを塗布する区 (園試処方区のみ)およびがく無処理区を設けた.園試処方区の第1果と第5果の尻腐 れ果は、がく無処理区では発生せず、がく片切除区およびワセリン塗布区においても発 生はごくわずかで有意差は確認できなかった.しかし、第1果と第5果の果実中のCa 濃度(第1果房のみ)は、水溶性Ca、全Ca濃度のいずれもがく無処理区に比べてがく 片切除区とワセリン塗布区で低下し、有意差が確認された.一方、1/2Ca区の第1果と 第5果の尻腐れ果発生率は、がく無処理区に比較してがく片切除区で有意に高くなり、 果実中の水溶性Ca、全Ca濃度は有意に低かった.園試処方区と1/2Ca区のいずれでも がく処理の有無による果実肥大速度の差異は認められなかった.さらに尻腐れ果の発生 が多かった1/2Ca区では、がく処理の対象としなかった第2~4果および第6~8果の尻 腐れ果発生率はいずれの果房においても、がく片切除区が無処理区より高くなる傾向に あり、果房全体を合わせた比較では有意に高かった.これらのことから、特に果実の肥 大初期においてがくからの蒸散は果実へのCa供給に大いに貢献しており、かつ茎から 果房への木部導管流の分配にも寄与していると考えられた.

第5章 総合考察

5.1 果実の急速肥大期における尻腐れの発生

尻腐れの発生は、開花後2週間前後の果実肥大初期に集中し、開花後3週間以降では ほとんど発生しない. Ho・White (2005)の報告によれば、細胞分裂がほぼ終了し細 胞の伸長が始まって果実が急速に肥大するこの時期には(Mapelli ら, 1978)、果実重 当たりの果実の肥大速度とCa蓄積量が最大に達する一方で、果実中のCa濃度は急速 に低下する.つまり、この時期は「果実のCa要求量に、果実へのCa供給量が追い付 かない」状態が起こりやすく、「アポプラストのCa²⁺欠乏」が発生するリスクが高まり、 尻腐れ果発生率が高まると推察される.本研究においても尻腐れ果確認の時期は、第2 章の実験で春作では開花後7日から15日の範囲にあり、平均値は10.3日、秋作では 12日~22日の範囲、平均17.3日であり(2-6回)、尻腐れの発生はこの時期に集中し た.

また,果実の急速な肥大が始まるこの時期には果実に流入する水分量のうち木部導管 流が担う割合がそれ以降に比べて大きいが(Ho ら, 1987),果実のサイズがまだ小さ いので果実に比べてがくの表面積が相対的に大きく,がくが果実への Ca 供給に果たす 役割が大きいと考えられる. 宇井・高野(1995)は大玉トマトを用いた実験で,開花 日にがく片を除去した果実はすべてに尻腐れが発生しその多くは落果したが,開花後 40日目にがく片を切除した果実では尻腐れの発生はなかったと報告している.本研究 でも,第4章の実験結果(第4-1表,第4-3表)から,がくからの蒸散は果実への Ca 供給に寄与し,急速肥大期の果実における Ca 需給関係の逼迫を緩和して尻腐れの発生 を抑制していると考えられた.

5.2 作型と尻腐れ発生の関係

短日で日射量が少なく低温の秋冬作に比べて,長日で日射量が多く,気温も上昇する 春夏作では尻腐れ果の発生率が高いことはよく知られている(Ho ら, 1993; Yoshida

52

ら, 2014).

本研究の第2章の実験結果からは、果実の肥大速度と果実中の水溶性 Ca 濃度との間 には負の相関関係があり、秋作に比べて春作で果実の肥大速度が大きく、果実中の水溶 性 Ca 濃度は低いことが確認された(第2-7図).また、果実中の水溶性 Ca 濃度と尻腐 れ果発生率との間の負の相関も多くの指摘がなされているが、本研究における実験でも 明らかな相関が確認された(第2-5図,第3-4図). さらに、日長が尻腐れ発生に及ぼ す影響を調査した第3章の実験では、秋作において補光により明期を春作と同等まで延 長することにより尻腐れ果発生率が有意に高くなり(第3-3図),果実中の水溶性 Ca 濃度と全 Ca 濃度は有意に低くなった(第 3-1 表,第 3-2 表). 補光による果実中の Ca 濃度の低下(第3-5図)と葉の気孔コンダクタンスの上昇(第3-5図)が確認されたこ とから、日没後も補光により継続した葉からの蒸散が果実への木部導管流を減少させ、 結果として果実への Ca 供給が抑制されたと考えられる. つまり, 春夏作では果実の肥 大速度が大きく,果実の Ca 要求レートが高くなることに加えて,葉からの蒸散も多く かつ長時間続き,この間は果実への木部導管流が大きく減少して果実への Ca 供給が抑 制される状態が起きやすくなるのであろう. その結果、「果実の Ca 要求量に、果実へ の Ca 供給量が追い付かない」状態が発生し, さらには「アポプラストの Ca²⁺欠乏」に 陥るリスクが高まり、尻腐れ果の発生が増加すると考えられる.

以上に述べたように、各章の実験結果は、「果実の Ca 要求量に、果実への Ca 供給量 が追い付かない」状態が尻腐れ果発生率を高めたことを示唆しており、この仮説を支持 していると考えられる.

5.3 尻腐れ果発生リスクの決定要因と尻腐れ果発生の防除

尻腐れ果の発生は、果実の急速肥大期にある果実に時間均等に発生するのではなく、 他の日に比べて明らかに多くの尻腐れ果が発生する「尻腐れ果多発日」が現れることが ある.尻腐れ果の多発日は、秋冬作よりも、尻腐れ果発生リスクが高まる春夏作で現れ ることが多い.本研究でも第2章の春作でその存在が認められた.第5-1図に日ごとの 尻腐れ果発生個数と日射量の変化を示した.



第5-1図 日ごとの尻腐れ果発生(確認) 個数と日射量(第2章実験1(春作))

図に示したように、6月4日、14日に最多の15個が発生しており、6月10日、12 日、16日は3個以下であった.なお、6月19日、20日の発生は1個であったが、当 該日には果実の急速肥大期にある果実数が減少しており評価から除外した.図から尻腐 れ果の発生は日射量が多い日が2、3日続いたときに多くなる傾向がみられ、逆に日射 量が少ない日の直後は発生が少なくなる傾向にあった.そこで、尻腐れ果発生数(確認 した果実数)と日射量の相関を調査してみると、第5・2図に示すように2日前の日射量 と日ごと尻腐れ果発生数との間の相関が最も高く(r=0.585)、当日、1日前、3日前の 日射量と尻腐れ果発生率との間に相関は確認できなかった(それぞれ r=0.053、0,152、 0.141). 尻腐れ果の発生確認は果実外部からの目視で行ったため、果実内部の最初の発 症から水浸し状組織の滲みが果実の外部から目視で確認できるようになるまで1日程 度を要したとすれば,前日の日射量が果実内部での尻腐れ症状の最初の発生にもっとも 大きく影響したと考えることができる.



第5-2図 推定尻腐れ果発生個数と日射量の関係(第2章実験1(春作)) **は1%水準で有意であることを示す.

すべての実験で明瞭な尻腐れ果多発日が発生するとは限らないが,気象条件が影響を 及ぼしたと思われる尻腐れ果発生数の日ごとの変動は多くの実験で観察されている.こ のような尻腐れ果多発日では,晴天で日射量が多い日が2,3日継続するなど一時的な 濃度低下要因が加わった可能性が高い.特に低 Ca 濃度培養液を施用した処理区では定 常的にアポプラスト Ca²⁺濃度が低く,一時的な濃度低下要因によりアポプラスト Ca²⁺ 濃度が欠乏状態にまで低下する果実が多く発生したのかもしれない.このような事態を 回避するには、以下の防止方法が考えられる.

(1) 定常状態でのアポプラスト Ca²⁺濃度を一時的な低下要因が加わった時にも欠乏状態にならないだけの濃度に保つよう努める.アポプラストの Ca²⁺濃度を一時的に低下させる要因はおそらく多様で複雑であることから,起き得るあらゆる場合を想定してその要因を除去,あるいは影響を軽減することは困難であろう.よって定常状態でのアポプラストの Ca²⁺濃度を保つことが基本的な対策になると考えられる.アポプラストの Ca²⁺濃度の動態を精度よく定量的に把握することは現状では困難と思われるが,これまで行ってきた実験結果から定常的なアポプラストの Ca²⁺濃度は果実中の水溶性 Ca²⁺濃度に反映されるのではないかと考えられる.本研究における実験でも果実頂端側 1/2 の水溶性 Ca 濃度が 0.3 mol·g⁻¹FW 以上の処理区では尻腐れ果はほとんど発生しておらず,保ちたい濃度の 1 つの目安となるかも知れない.

(2) 一時的な要因によるアポプラスト Ca²⁺濃度の低下をできるだけ小さくすることも 必要となる.しかし,起きうる可能性がある要因は数多くあると思われるので,作型・ 品種や栽培方法ごとに,頻度が高く影響が大きい要因を特定し優先的に対応することに なる.

具体的な方法は,栽培方法,環境条件などによって様々の方法が考えられるが,基本 的には,上記(1)と(2)を組み合わせることが望ましい.例えば,佐藤ら(2004)は摘葉 により尻腐れ果発生率が低下したと報告している.摘葉により植物体全体で葉からの蒸 散量が低下するので,本研究の実験結果からも葉からの蒸散との競合による果房,果実 への木部導管流の抑制が緩和された結果,果実へのCa供給量増加したのではないかと 推察される.この方法は,定常状態でのアポプラストCa²⁺濃度を確保すると同時に, 一時的な葉の蒸散量の高まりによる果房,果実への木部導管流の減少を緩和する効果も 期待できそうである.しかし,過度の摘葉は光合成産物生成量を減少させるため,適切 な葉面積については今後の重要な課題といえる.葉と果実をつなぐ維管束のネットワー ク(宍戸,1988)なども考慮して摘葉の方法とその程度を注意深く検討する必要があ るのかも知れない.

5.4 残された課題と今後への展望

(1) 本研究における実験の結果は、「果実の Ca 要求量に、果実への Ca 供給量が追い 付かない」状態が「アポプラストの Ca²⁺欠乏」を引き起こし、これが尻腐れ発生の要 因とする仮説を支持すると考えている.しかし、「アポプラストの Ca²⁺欠乏」状態での 果実の肥大から尻腐れの初期症状である原形質膜のリーク増大,水浸状組織の発生に至 る経路が解明されなければ、尻腐れの要因の発生から尻腐れの発症に至る全体像は理解 できない. Ca²⁺は細胞壁を構成するペクチン質の架橋で大量に必要とされることから (Taiz・Zeiger, 2002a), アポプラストの Ca²⁺欠乏が健全な細胞壁の構築の障害になる ことは容易に理解できる.一方,信号伝達系で Ca²⁺が果たす多様で重要な役割もこれ まで多数報告されているが、近年、細胞の伸長に関わる信号伝達においても同様にアポ プラストの Ca²⁺が果たす重要な役割を示唆する報告が増えており(Bosch・Hepler, 2005; Hepler, 2005; Kohorn, 2016; Kurusu ら, 2013; Wolf ら, 2012;), アポプ ラストの Ca²⁺欠乏状態が細胞の正常な伸長を阻害することも容易に推測できる. しか し、それらが尻腐れの初期症状を引き起こすまでの経路につながっているかは明らかで ない.他方,Ca²⁺の欠乏が活性酸素による原形質膜リン脂質の過酸化分解を引き起こす 仕組みと尻腐れへの関りについての仮説が提案されているが (Mestre ら, 2012), 検 証はなされていない. 尻腐れの発生プロセスを細胞レベルで理解するには, 今後尻腐れ 発生に至る経路の解明が不可欠である.

(2) 農業の高度 ICT 化技術を活用した尻腐れを含む生理障害の発生リスクのリアルタイム評価と効果的な防除処理の実施.

近年施設栽培では栽培環境の情報収集制御技術が進展してきており(星,2008),ト マトのハウス栽培でも ICT を活用した栽培システムの実用化が進められるようになっ

57

てきた(IHI 統合環境栽培システム, 2016). 尻腐れの発生要因の理解がさらに進み, データが蓄積されていけば, それぞれの生産現場に合わせてチューニングした情報収集 制御技術を活用して尻腐れ果の発生リスクをリアルタイムで評価し, きめ細かい効果的 な尻腐れ発生のコントロールができるようになることが期待される. そうすれば, 高品 質トマトの生産においても尻腐れ発生のリスクがより高い栽培方法, 処理の採用も可能 になるだろう.

第6章 摘 要

トマトは日本国内でも年間約72万トン,世界全体では年間1億トン以上が生産され る主要な野菜である. 尻腐れは古くから知られたトマトの重要な生理障害の1つで,発 生すると果実の商品価値を著しく損なうため,これまで多くの研究がなされてきた. し かし, 尻腐れ発生に関わると思われる要因・条件は多様で詳しい発生要因については未 だ十分理解されていない. 一般的な栽培では尻腐れの発生は,これまでに蓄積された知 見や経験により制御可能になりつつある.しかし,水ストレスや塩ストレスにさらされ ることが多い,高品質トマト・高糖度トマトの栽培や春夏季の栽培などでは尻腐れが多 発することがある.特に日本ではトマト生産量の90%以上が生鮮トマトであり,付加 価値の高い高品質トマト・高糖度トマトの生産で尻腐れ防除は依然大きな課題の一つと なっており, 尻腐れの防除を的確に効率よく行うには,その要因をより正確に理解する ことが必要である.

そこで本研究では, 尻腐れ果発生率が高まる春夏期の栽培における尻腐れ果の発生要 因を栽培実験により明らかにすることを目的とした.そのため,実験では中玉トマトを 材料に用い, 園試処方培養液を基準に Ca/K 比のみが異なる低 Ca 濃度培養液を用いた 根域制限栽培により,果実の肥大速度に留意しつつ,Ca が転流する木部導管流の植物 体中の流れ,果実への分配に着目して「果実の Ca 要求量に,果実への Ca 供給量が追 い付かない」状態となるリスクを高める要因を特定することを試みた.そして,そのよ うな状態に陥るリスクを軽減することによる尻腐れの防除方法を検討した.

第2章では気温と日射量が大きく異なる2つの作型で栽培実験を行い,栽培季節の違いが尻腐れ果発生率と果実中のCa濃度に与える影響を調査した.実験結果から春作, 秋作ともに園試処方区に比べて低Ca濃度の培養液を施用した,1/4Ca区,1/8Ca区で尻腐れ果発生率が高く,秋作に比べて春作でより高かった.果実先端部の水溶性Ca濃度 と尻腐れ果発生率との間で有意な負の相関が認められ,果実先端部の水溶性Ca濃度は 秋作に比べて春作では大幅に低かった.果実先端部の水溶性 Ca 濃度が 0.2 mol·g⁻¹FW 以下になると尻腐れ果の発生が急増したが,この値は著者らが大玉トマト'ハウス桃太郎'を用いて行った以前の実験で得られた値とほぼ同じであった.秋作に比べて気温が高く日射も強い春作では果実の肥大速度が約3倍であった.果実の肥大速度と果実先端部の水溶性 Ca 濃度との間に有意な負の相関が認められたことから,果実が活発に肥大する条件下では,果実の Ca 要求が増加すると同時に希釈効果によって果実先端部の水溶性 Ca 濃度が低下して尻腐れ果発生への感受性が高くなると考えられた.

第3章では、秋作において補光で明期を約16時間に延長することにより長日条件が トマト果実中の水溶性 Ca 濃度と尻腐れの発生に及ぼす影響を調査した. 園試処方の Ca/K 比のみを変更した低 Ca 濃度(1/4Ca, 1/8Ca) 培養液を給液した. 400 W メタル ハライドランプ2灯により草冠で60~168 mol·m²G⁻¹ (PPFD)の範囲で補光を行った 結果,非補光区に比べて補光区で尻腐れ果の割合が顕著に増加し、正常果率は低下した. 果実中の水溶性 Ca 濃度と全 Ca 濃度はいずれも補光により低下した. 果実の肥大速度 に補光の有無による差異は認められなかったが、葉の気孔コンダクタンスと補光強度と の間には正の相関関係が確認された. つまり、日没後も補光期間中は葉からの蒸散が継 続し、木部導管を通じた果実への Ca 転流が抑制されたと考えられる.以上のことから、 晩春から盛夏期には、高温と強日射による果実肥大速度の上昇と Ca 要求量増大に加え て短い暗期が木部導管流による果実への Ca 転流を抑制することも尻腐れ果発生率を高 める大きな要因の1つと考えられた.

第4章では果実の急速肥大期のがくからの蒸散抑制が尻腐れ果発生率および果実中のCa濃度に及ぼす影響を調査した.園試処方標準とCa/K比のみを変更した1/2Ca濃度培養液を施用し、がくからの蒸散抑制の影響を調べるため、各果房全8果のうち第1果と第5果のがく片を、開花後5日を基準に着果が確認できた時点ですべて切除する区(園 試処方区、1/2Ca区)、がく片にワセリンを塗布する区(園試処方区のみ)およびがく無 処理区を設けた.園試処方区の第1果と第5果の尻腐れ果は、がく無処理区では発生せ ず、がく片切除区およびワセリン塗布区においても発生はごくわずかで有意差は確認で きなかった.しかし、第1果と第5果の果実中のCa濃度(第1果房のみ)は、水溶性 Ca、全 Caのいずれもがく無処理区に比べてがく片切除区とワセリン塗布区で低下し、 有意差が確認された.一方、1/2Ca区の第1果と第5果の尻腐れ果は、がく無処理区に 比較してがく片切除区で有意に高く、果実中の水溶性Ca、全Ca濃度は有意に低かった. 園試処方区と1/2Ca区のいずれでもがく処理の有無による果実肥大速度の差異は認めら れなかった.さらに尻腐れ果の発生が多かった1/2Ca区では、がく処理の対象としなか った第2~4果および第6~8果の尻腐れ果発生率をがく片切除区とがく無処理区とで比 較してみると、がく片切除区で高くなる傾向にあり、果房全体を合わせた比較では有意 に高かった.これらのことから、特に果実の肥大初期においてがくからの蒸散は果実へ のCa供給に大いに貢献しており、かつ茎から果房への木部導管流の分配にも寄与して いると考えられた.

Ho・White (2005) は、これまでに報告されている多様な要因を細胞レベルで分析し、 尻腐れの発生要因は「果実の Ca 要求量に、果実への Ca 供給量が追い付かない」状態 に帰結し、この状態がアポプラストの Ca²⁺欠乏状態を引き起こす結果、尻腐れが誘発さ れるのではないかと推察しているが、以上に述べた実験結果は、「果実の Ca 要求量に、 果実への Ca 供給量が追い付かない」状態が尻腐れ果発生率を高めたことを示唆してお り、この仮説を支持していると考えられる.しかし、アポプラストの Ca²⁺欠乏状態から 尻腐れの発症に至る経路は未だほとんど説明されておらず、尻腐れの発生プロセスを細 胞レベルで理解するには、今後その経路の解明が不可欠である.

尻腐れ果の発生では、他の日に比べて明らかに多くの尻腐れ果が発生する、尻腐れ果 多発日の存在は、アポプラスト Ca²⁺濃度は定常状態の濃度に一時的な低下が重畳され て変動することを示唆している.しかし、アポプラスト Ca²⁺濃度の一時的な低下要因 は数多くあると考えられる. 尻腐れ果の発生を効果的に防除するには,定常状態のアポ プラスト Ca²⁺濃度を一定程度以上に保つことを基本として,影響の大きい一時的変動 要因を緩和する方法を組み合わせることが必要である. アポプラストの Ca²⁺濃度の動 態を精度よく定量的に把握することは現状では困難と思われるが,これまで行ってきた 実験結果から定常的なアポプラストの Ca²⁺濃度は果実中の水溶性 Ca²⁺濃度に反映され るのではないかと考えられる. 本研究における実験でも果実頂端側 1/2 の水溶性 Ca 濃 度が 0.3 mol·g⁻¹FW 以上の処理区では尻腐れ果はほとんど発生しておらず,定常状態 で保ちたい濃度の1つの目安となるかも知れない. 具体的な方法の1つとして,佐藤ら (2004)の報告にある摘葉は,摘葉の方法とその程度を注意深く検討する必要はある が,定常的,一時的両方の変動を軽減できる可能性がある.

近年施設栽培では栽培環境の情報収集制御技術が進展してきており,トマトのハウス 栽培でも ICT を活用した栽培システムの実用化が進められるようになってきた. 尻腐 れの発生要因の理解がさらに進み,データが蓄積されていけば,そのような情報収集制 御技術を活用して尻腐れ果の発生リスクをリアルタイムで評価し,きめ細かい効果的な 尻腐れ発生のコントロールができるようになることが期待される. そうすれば,高品質 トマトの生産においても尻腐れ発生のリスクがより高い栽培方法,処理の採用も可能に なるだろう.

62

本研究の機会を与えていただき,終始熱心なご指導と格別のご支援を賜りました,作 物開花制御学研究室教授 吉田裕一博士,並びに同教授 後藤丹十郎博士に心から感謝 申し上げます.また,野菜園芸学研究室准教授 安場健一郎博士,同助教 田中義行博 士にも貴重なご助言と丁寧なご指導をいただき,深く感謝いたします. さらに,植物 機能開発学講座教授 斎藤邦行博士をはじめ,同講座の先生方にも多くのご指導を頂き, 厚く御礼申し上げます.また,本研究を開始するにあたっては植物機能開発学講座教授 桝田正治博士 (現名誉教授),同助教授 村上賢治博士 (現石川県立大学教授)にも多 くのご指導を賜り,感謝申し上げます.

一世代以上に年齢が離れ、しかも異分野出身であったにもかかわらず温かく受け入れ ていただいた Tran Duy Vinh 氏をはじめ、作物開花制御学研究室と野菜園芸学研究室の 学生、卒業生の皆様に心から感謝いたします.また、本研究の実験を遂行するにあたっ ては山陽圏フィールド科学センターの皆様に多くのご協力をいただきました.ここに感 謝申し上げます.最後になりますが、異分野に進むにあたり、貴重なご助言と励ましを 賜りました環境生命科学研究科長で生物機能化学講座教授 神崎浩博士に心から感謝 の意を表します.

63

引用文献

- Araki, T., T. Eguchi, T. Wajima, S. Yoshida and M. Kitano. 2004. Dynamic Analysis of Growth, Water Balance and Sap Fluxesthrough Phloem and Xylem in a Tomato Fruit :Short-term Effect of Water Stress. Environ. Control in Biol.42(3): 225-240.
- Belda, R. M., J. S. Fenlon and L. C. Ho. 1996. Salinity effects on the xylem vessels in tomato fruit amaong cultivars with different susceptibility to blossom-end rot. J. Hort. Sci. 71: 173-179.
- Bosch, M.and P. K. Heplar. 2005. Pectin methylesterases and pectin dynamics in pollen tubes. Plant Cell 17: 3219-3226.
- de Freitas, S. T., M. Padda, Q. Wu, S. Park and E. J. Mitcham. 2011. Dynamic alternations in cellular and molecular components during blossom-end rot development in tomatoes expressing sCAX1, a constitutively active Ca²⁺/H⁺ antiporter from Arabidopsis. Plant Physiol. 156: 8446855.
- Ehret, L. D. and L. C. Ho. 1986a. Translocation of Calcium in Relation to Tomato Fruit Growth. Ann. Bot. 58: 679-688.
- Ehret, L. D. and L. C. Ho. 1986b. Effects of Osmotic Potential in Nutrient Solution on Diurnal Growth of Tomato Fruit. J. Exp.Bot. 37: 1294-1302.
- Estabrooks, D. N. and H. Tiessen. 1972. Blossom-end rot and black seeds of tomatoes. Can. J. Plant Sci. 52: 1076-1077.

FAOSRAT. 2013.

- Gillaspy, G., H. Ben-David and W. Gluissem. 1993. Fruits: A Developmental Perspective, Plant Cell 5: 1439-1451.
- Gilroy, S., P.C. Bethke and R.L. Jones. 1993. Calcium homeostasis in plants. J. Cell Sci. 106: 4536462.

- Guichard, S., G. Gary, G. Leonardi and N. Bertin. 2005. Analysis of growth and water relations of tomato fruits in relation to air vapor pressure deficit and plant fruit load. J. Plant Growth Regul. 24: 2016213.
- Hepler, P. K. 2005. Calcium: Regulator of plant growth and development. Plant Cell 17: 2142-2155.
- Hoagland, D. R. and D. I. Arnon. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. Calif. Agr. Expt. Sta. Circ. 347: 1632.
- Ho L. C., R. I. Grange and A. J. Picken. 1987. An analysis of the accumulation of water and dry matter in tomato fruit. Plant, Cell and Enviroment. 10: 157-162.
- Ho, L.C., R. Belda, M. Brown, J. Andrews and P. Adams. 1993. Uptake and transport of calcium and the possible causes of blossom-end rot in tomato. J. Exp. Bot. 44: 5096518.
- Ho, L.C. and P. J. White. 2005. A cellular hypothesis for the induction of blossom-end rot in tomato. Ann. Bot. 95: 5716581.
- 星 岳彦. 2008. ユビキタス環境制御システムによる施設園芸生産のICT化. 農業情報 研究 17: 13-18.
- IHI 統合環境栽培システム. 2016. IHI技報 56: 22-23.
- 稲田秀俊・水野(山邉)あずさ・中原正一.2010.トマトの葉の気孔拡散伝導度および 素散速度に対する環境要因の影響.茨城農総セ園研報.17:17-22.
- Kinoshita, T., M. Doi, N. Suetsugu, T. Kagawa, M. Wada and K. Shimazaki. 2001. Photo 1 and photo 2 mediate blue light regulation of stomatal opening. Nature. 414: 656-660.
- 北野雅治・荒木卓哉. 2001. トマトにおける果実生長および光合成産物の転流の 動態に対する環境作用(第2報)―師管液および道管液フラックスと果実水収支の 解析―. 生物環境調節. 39(1): 43-51.

Kohorn, B. D. 2016. Cell wall-associated kinases and pectin perception. J. Exp. Bot. 67:

489-494.

- Kurusu, T., K. Kuchitsu, M. Nakano, Y. Nakayama and H. Iida. 2013. Plant mechanosensing and Ca²⁺ transport. T. Plant Sci. 18: 227-233.
- Lyon, C.B., K.C. Beeson and M. Barrentine. 1942. Macro-element nutrition of the tomato plants as correlated with fruitfulness and occurrence of blossom-end rot. Bot. Gaz. 103: 6516657.
- Malone, M. and J. Andrews. 2001. The distribution of xylem hydraulic resistance in the fruiting truss of tomato. Plant, Cell and Environment. 24: 565-570.
- Marcelis, L.F.M. and L. C. Ho. 1999. Blossom-end rot in relation to growth rate and calcium content in fruits of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). J.Exp. Bot. 50: 3576363.
- Mapelli, S., C. Frova, G. Torti and G. P. Soressi. 1978. Relationship between set, development and activities of growth regulators in tomato fruits. Plant & Cell Physiol. 19: 1281-1288
- Mestre, T. C., F. Garcia-Sanchez, F. Rubio, V. Martinez and R. M. Rivero. 2012. Gultathione homeostasis as an important and novel factor controlling blossom-end rot development in calcium-deficient tomato fruits. Plant Physiol. 169: 1719-1727.
- Nakano A. and Y.Uehara. 1996. The effects of kaolin clay on cuticle transpiration in tomato. Acta Hort. 440: 233-238.
- Nonami, H., T. Fukuyama, M. Yamamoto, L. Yang and Y. Hashimoto. 1995. Blossom-end rot of tomato plants may not be directly caused by calcium deficiency. Acta Hort. 395: 1076114.
- 農林水産省. 2016. 平成27年産野菜生産出荷統計.
- 大山光男・吉田裕一. 2011. 中玉トマト果実の Ca 濃度と尻腐れ果発生に及ぼす培養液 中の K/Ca 比の影響. 園学研. 10 (別 2): 163.

大山光男・吉田裕一・Than Duy Vinh・田中義行・安場健一郎・後藤丹十郎. 2015. 萼

片の切除が中玉トマト果実の水溶性 Ca 濃度と尻腐れ発生に及ぼす影響. 園学研. 14(別1):128.

- 大山光男・吉田裕一・Tran Duy Vinh・田中義行・安場健一郎・後藤丹十郎. 2016. 中玉 トマト÷シンディスィートのの尻腐れ果発生および果実中の水溶性 Ca 濃度の季節 変化と果実肥大速度の関係. 園学研. 15:189-196.
- Pearce, D.B., R. I. Grange and K. Hardwick. 1993a. The growth of young tomato fruit. I. Effects temperature and irradiance on fruits growth in controlled environments. J. Hort. Sci. 68:1-11.
- Pearce, D.B., R. I. Grange and K. Hardwick. 1993b. The growth of young tomato fruit. II. Environmental influences on glasshouse crops grown in rockwool or nutrient film. J. Hort. Sci. 68:13-23.
- 佐藤 卓・森田健太郎・池田英男・古川 一・飯村裕史・小湊正幸. 2004. 摘葉がト マトの尻腐れ果発生に及ぼす影響. 園学研 3:183-186.
- Saure, M. C. 2001. Blossom-end rot in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) a calcium- or a stress-related disorder? Sci.Hortic. 90: 1936208.
- 宍戸良洋・施山紀男・堀 裕. 1988. トマトにおける光合成産物の分配パターンと 維管束配列の相互関係に関する研究. 園学雑. 57:418-425.
- Spurr, A. R. 1959. Anatomical aspects of blossom-end rot in the tomato with special reference to calcium nutrition. Hilgardia 28: 269-295.
- Suzuki, K., M. Shono and Y. Egawa. 2003. Localization of calcium in the pericarp cells of tomato fruits during the development of blossom-end rot. Protoplasma. 222: 1496156.
- Taiz, L. and E. Zeiger. 2002a. 植物生理学第3版(西谷和彦/島崎研一郎監訳). p. 3176344. 培風館. 東京.
- Taiz, L. and E. Zeiger. 2002b. 植物生理学第3版(西谷和彦/島崎研一郎監訳). p. 1896218.

培風館. 東京.

- 寺林 敏・宮負要一・高畠俊郎・並木隆和. 1988. 水耕トマトの尻腐れ果発生と果実内 カルシウム含量との関係. 京都府大学報. 40: 8614.
- 宇井 睦・高野泰吉. 1995a. 果実肥大期における温度と培養液濃度が水耕トマトの尻 ぐされ発生に及ぼす影響. 生物環境調節. 33:7-14.
- 宇井 睦・高野泰吉. 1995b. 果実肥大期におけるガク片除去と果房送風,袋かけが 水耕トマトの尻ぐされ発生に及ぼす影響. 生物環境調節. 33:15-21.
- Van Ieperen W., V. S. Volkov and U. Van Meeteren. 2003.Distribution of xylem hydraulic resistance in fruiting trussof tomato in⁻uenced by water stress. J. Exp.Bot. 54: 317-324.
- White, P. J. and M. R. Broadley. 2003. Calcium in Plants. Ann. Bot. 92: 4876511.
- Wolf, S., K.Hématy and H. Höfte. 2012. Growth Control and Cell Wall Signaling in Plants. Annu. Rev. Plant Biol. 63: 381-407.
- Yoshida, Y., N. Irie, T. D. Vinh, M. Ooyama, Y. Tanaka, K. Yasuba and T. Goto. 2014. Incidence of blossom-end rot in relation to the water-soluble calcium concentration in tomato fruits as affected by calcium nutrition and cropping season. J. Japan. Hort. Sci. 83: 2826289.
- 吉田裕一・松野太樹・新開 礼・後藤丹十郎. 2007. 根域容量と日射比例給液制御によ る給液量がトマトの生育・収量と果実品質に及ぼす影響. 岡山大学農学部学術報 告. 96:37642.
- 吉田裕一・新開 礼・大山光男・村上賢治・後藤丹十郎. 2012. 培養液中Ca濃度が根域 制限栽培したトマト果実の水溶性Ca濃度と尻腐れ果発生に及ぼす影響. 岡山大学 農学部学術報告. 102: 21628.