

施設栽培のナス科果菜類における花粉媒介昆虫利用に関する研究

飛川 光治

Studies on Use of Pollinators for Tomatoes and Eggplants in Protected Culture

Mitsuharu Hikawa

序

岡山県では、トマトとナスを戦略的推進品目として重視し、生産振興を図っている。トマトとナスは栽培管理に多くの労働時間を要するため、生産振興には栽培管理技術の省力化が喫緊の課題の一つになっている。総労働時間の5～20%を費やすとされている着果処理作業を省力的な花粉媒介昆虫利用に変えることは、栽培管理技術の省力化に繋がり、生産振興に貢献することが期待される。しかし、岡山県の主要作型であるトマトの夏秋栽培およびナスの促成栽培で花粉媒介昆虫を利用することは、従来の利用技術では困難であった。

そこで、農業研究所では、花粉媒介昆虫を周年利用するために、これらの作型における利用技術を確立するための研究に取り組んできた。その結果、トマトでは高温に弱いマルハナバチの管理技術や夏期に利用できる地域の判別式、ナスでは燃料消費をできるだけ節約しながら稔性花粉量を効率的に増量できる昼間の高温管理法等の技術を開発し、トマトとナス栽培で花粉媒介昆虫の周年利用を可能にした。

本論文は、野菜・花研究室飛川専門研究員が平成11年の研究開始以来逐次発表してきた一連の研究成果を取りまとめたもので、実用性は勿論のこと、学術的にも貴重な業績であるので、広く刊行し、一般の参考に供する次第である。

なお、本論文は同氏が平成21年3月25日に岡山大学から授与された博士（農学）の学位論文であることを付記しておく。

平成22年11月

岡山県農林水産総合センター農業研究所長
博士（農学） 伊達寛敬

目次

緒論	95
第1章 セイヨウオオマルハナバチの巣箱管理	
第1節 巣箱の温度とコロニーの寿命	97
第2節 巣箱の高温対策	98
第2章 セイヨウオオマルハナバチの利用	
第1節 トマトの雨除け栽培での利用	99
第2節 ナスの雨除け栽培での利用	101
第3章 セイヨウミツバチの利用	
第1節 トマトの半促成栽培での利用	103
第2節 ナスの促成栽培での利用	105
第4章 キオビオオハリナシバチの利用	
第1節 トマトの抑制栽培での利用	110
第2節 トマトの雨除け栽培での利用	113
第3節 ナスの促成栽培での利用	117
第5章 低温期のナス栽培における花粉媒介昆虫の利用技術	
第1節 最低夜温が稔性花粉量に及ぼす影響	120
第2節 最低昼温が稔性花粉量に及ぼす影響	121
第3節 昼間の高温管理による稔性花粉量増加効果	122
第4節 花粉発芽に及ぼす温度の影響	124
第5節 受粉時の気温が収量および果実外観に及ぼす影響	126
第6節 保温性を高めた施設におけるセイヨウミツバチの受粉効果	129
第6章 総合考察	133
摘要	138
引用文献	139
英文摘要	142

緒言

トマトやナスは我が国の施設果菜の主要品目であるが、1940年代以前は露地栽培が主流であった。しかし、1950年代にプラスチックハウスが普及し、これを利用した簡易で安価な施設栽培が可能になって以来、1980年代にかけてトマトやナスの施設栽培が急速に拡大した。トマトやナスは本来、風媒花または虫媒花であり、露地栽培では風や自然発生する訪花昆虫によって受粉し着果するため、特別な着果処理は必要なかった。しかし、施設栽培では風媒や虫媒による安定した受粉が行われなため、何らかの人為的な着果処理が必要となった(池田, 1995)。しかし、果菜類の花は受粉しなくても、オーキシンなどの植物ホルモンを花に処理すると、受精することなく果実が肥大する(寺林・矢澤, 2003)。そのため、トマトやナスの施設栽培では、化学合成された植物ホルモン剤を処理して単為結果させる方法が実用化された。この植物ホルモンによる着果処理方法を用いると、花粉の成熟や発芽に適した温度よりもかなり低い温度での栽培が可能で(菅原, 1997; 前田, 2001)、暖房コストが節減できることなどから、生産現場で広く利用されてきた。

ところが、近年、食の安全・安心に対する消費者の関心の高まりに伴い、化学合成農薬の使用を削減するための新たな技術開発の必要性に迫られている。同時に生産者の高齢化や担い手不足から農作業の省力化に対するニーズも高まってきた。トマトやナスへの植物ホルモン剤の処理は、開花時に花または花房単位で散布する必要があるため処理に時間を要し、例えば、ナスの促成栽培では総労働時間の約20% (宗円, 1999)、トマトの抑制栽培では約5% (池田・忠内, 1992) を占めている。化学合成された植物ホルモン剤以外の着果処理方法として、セイヨウミツバチ *Apis mellifera* Linne (ハチ目：ミツバチ科) などの飼養可能な花粉媒介昆虫を施設内に放飼して受粉に利用する方法がある。この花粉媒介昆虫の利用は、処理労力が不要で極めて省力的である(菅原, 1992)。そこで、花粉媒介昆虫をトマトおよびナスの着果処理に周年利用することを目的として本研究を実施した。

花粉媒介昆虫のうち、一般によく知られるセイヨウミツバチは古くから世界中で飼養され(スーレイ, 1985)、花粉媒介昆虫としても多くの作物で利用されてきた(岡田, 1975)。特に、1967年に西ドイツで、セイヨウミツバチを放飼するとハウス栽培のイチゴの形状不良果防止に効果が認められ、翌年には日本でも

その効果が確認されると、花粉媒介昆虫としての評価が急速に高まり(下鳥, 1992; 松浦, 1998)、イチゴやメロンなどの交配に広く利用されるようになった。ところが、セイヨウミツバチは花蜜を分泌しないナス科植物に訪花しない(松浦, 1998)とされ、他に実用可能な花粉媒介昆虫がなかったことや花粉媒介昆虫に悪影響の少ない殺虫剤の不足などの理由で、我が国のトマトやナスの施設栽培での花粉媒介昆虫の利用は実用化しなかった。その後、1980年代後半にベルギーで、ヨーロッパ原産のセイヨウオオマルハナバチ *Bombus terrestris* Linnaeus (ハチ目ミツバチ科) が施設栽培トマトの交配用に商品化され、ヨーロッパやニュージーランドで広く使用されるようになった(小野・和田, 1996)。このセイヨウオオマルハナバチが1991年に我が国に導入され(池田・忠内, 1995)、併せて、花粉媒介昆虫に悪影響の少ない選択的殺虫剤の開発が進んだ(永井, 1993; 日本バイオリジカルコントロール協議会, 2006など)ことから、冬春期の施設栽培トマトでは、セイヨウオオマルハナバチが広く利用されるようになった(農林水産省農産園芸局野菜振興課, 2000)。

しかし、寒地系の昆虫であるセイヨウオオマルハナバチを栽培期間の大半が高温期に当たる夏秋期のトマトやナス栽培で直ちに利用することは困難であった。そこで、第2章では、ナスおよびトマトの栽培ハウス内にセイヨウオオマルハナバチを放飼し、巣箱の設置場所の温度とコロニーの利用可能期間の関係を明らかにした。併せて、高温期にコロニーを長期間維持し、交配に利用するために巣箱を地下に埋設して巣温を低下させる技術を開発した。トマトはセイヨウオオマルハナバチの訪花が順調であっても、高温期に稔性花粉量の減少することが多く、形成される種子数が不足しやすい。果実の大きさは1果当たりの種子数と高い相関を示す(寺林・矢澤, 2003)ため、果実肥大も不十分になる。そこで、第3章では、稔性花粉の生成量に及ぼす気温の影響の解析から、夏期にセイヨウオオマルハナバチが利用できる時期や地域の判別法を開発した。さらに、巣箱を地下埋設した夏秋ナスの雨除け栽培でセイヨウオオマルハナバチの受粉効果を実証した。

2006年9月、セイヨウオオマルハナバチは施設外への逸出による野生化とそれに伴う生態系への悪影響が懸念されることから(加藤, 1993; 小野, 1994; 鷺谷, 1998)、「特定外来生物による生態系等に係る被害の防止に関する法律」により「特定外来生物」に指定され

飼養が規制された。農作物での受粉用にセイヨウオオマルハナバチを利用するには、施設開口部への逃亡防止用ネットの展張などの逃亡防止措置、許可申請書や定期的な報告書の提出などが必要になり、生産者の負担が大きくなった。セイヨウオオマルハナバチに替わる花粉媒介昆虫として我が国在来のクロマルハナバチ *Bombus ignitus* Smith (ハチ目ミツバチ科) の利用も試みられている (光畑・和田, 2005)。しかし、在来種であっても特定の個体群を大量増殖して各地に放飼することは、地域個体群の遺伝的多様性を損なう恐れがある (五箇, 2002; 米田ら, 2008)。そこで、第4章では、明治初期に導入され、全国の野外で広く飼養されているにも関わらず、土着の天敵の作用で帰化できないセイヨウミツバチ (小野, 1996) がナスで利用可能なことを明らかにし、第5章では、ハリナシバチの一種キオビオオハリナシバチ *Melipona quadrifasciata* Lepeletier (ハチ目ミツバチ科) がトマトおよびナスで利用可能なことを明らかにした。

なお、ハリナシバチは熱帯・亜熱帯地方に分布するハリナシバチ亜科 *Meliponinae* の社会性ハナバチの総称で、これまでに23属374種が記録されている (Michener, 2000)。原産地の中南米では古くから蜂蜜や蜜蝋の生産を目的に養蜂化されている (天野, 2003) が、施設栽培の花粉媒介昆虫としての利用も最近検討され始めている (前田ら, 1992; Slaa et al., 2000; Cauich et al., 2004)。天野 (2003) は、ハリナシバチ類を我が国で利用する場合の有利性の一つとして、分封時に処女王の交尾相手が野外にはおらず、成熟女王は飛べず、また野外では冬期の低温でコロニーが崩壊するので野生定着による生態系への悪影響がないことを指摘している。

ナスの交配にはセイヨウオオマルハナバチ、セイヨウミツバチおよびキオビオオハリナシバチのいずれも利用可能であったが、低温期には、稔性花粉量が減少するために受精が不十分になり、着果率や果実品質が低下する問題が残った。そこで、第6章では、低温期にナスの稔性花粉量を増加させる方法について検討し、昼の栽培温度を高めることが効果的なことを明らかにした。さらに、化石燃料の高騰によって暖房用の燃料費が問題になることから、暖房せずに昼の気温が高まる空気膜ハウスを用いることを考案した。これら

によって、他の2種に比べて交配能力が劣るために、冬期のナス栽培での利用が困難なセイヨウミツバチの利用に道を拓いた。

本研究は、1999年から2008年に岡山県農業総合センター農業試験場で実施した。これらの研究成果の大部分をすでに発表した (飛川, 2004, 2007, 2008a, 2008b; 飛川・石倉, 2008; 飛川・宮永, 2006, 2007; Hikawa and Miyana, 2009) が、本論文はこれに未発表の成果を含めてとりまとめたものである。

本論文をとりまとめるにあたって、懇切な御助言ならびに御校閲を賜り、本論文を提出まで導いてくださった元岡山大学資源生物科学研究所教授積木久明博士に厚く御礼申し上げます。また、本論文の御校閲を賜った岡山大学環境学研究科教授宮竹貴久博士、岡山大学資源植物科学研究所准教授園田昌司博士、岡山県農林水産総合センター農業研究所特別研究員田村史人氏に深謝する。

岡山県農林水産総合センター農業研究所副所長永井一哉博士には本論文のとりまとめに終始懇切なご指導をいただいた。元岡山県農業総合センター農業試験場場長鴻野信輔氏には本研究の端緒を与えていただいた。岡山県農林水産総合センター農業研究所所長伊達寛敬博士には本論文のとりまとめにご鞭撻をいただいた。島根大学生物資源科学部准教授宮永龍一博士ならびに岡山県岡山普及指導センター主任石倉聡氏には共同研究者として本研究の一部を分担していただいた。石原産業株式会社中央研究所生物科学研究室IPMグループリーダー平野耕治博士には花粉媒介昆虫に関する貴重なご助言をいただいた。岡山県農林水産総合センター農業研究所の岸本直樹氏、中本武徳氏、大塚真史氏、花房一恵氏、長田和美氏には、各種調査にご協力をいただいた。記して深謝の意を表する。

なお、本研究は「中山間地域における野菜等の多品目少量生産流通技術 (1999~2001年, 農林水産省助成事業)」、 「多様な生物機能を活用した快適で安心な促成ナス生産技術 (2002年, 岡山県単独事業)」、 「有機減農薬ナスの生産安定技術の確立 (2003~2007年, 岡山県単独事業)」、 「送粉昆虫キオビオオハリナシバチの大量増殖・利用技術 (2004~2006年, 農林水産省助成事業)」、 「ナス栽培におけるミツバチ長期利用技術の開発 (2008年, 岡山県単独事業)」により実施した。

第1章 セイヨウオオマルハナバチの巣箱管理

第1節 巣箱の温度とコロニーの寿命

ベルギーやオランダなどのヨーロッパ原産で寒地系の昆虫であるセイヨウオオマルハナバチは低温に強く、晴天では5~7℃からワーカーが訪花活動を開始し、15~25℃の範囲で最も訪花活動が活発になる。しかし、高温には弱く、30℃以上で訪花活動が低下し、35℃以上では停止するとともに巣内の幼虫などが死亡し、コロニーは崩壊する（池田・忠内，1992）。そのため、栽培期間の大半が高温期に当たる夏秋期のトマトやナス栽培でそのまま利用することは困難である。

セイヨウオオマルハナバチを高温期に利用するには、巣箱をできるだけ涼しい環境に設置することが望ましい。しかし、クーラーなどを使用して強制的に施設内の気温を下げるのは経済的に困難であり、他の高温対策が求められる。そこで、高温対策の手掛かりを得るために、ナスおよびトマトの栽培ハウス内に巣箱を設置してセイヨウオオマルハナバチを放飼し、巣箱の温度とコロニーの寿命の関係を検討した。

材料および方法

1999年および2000年に、岡山県農業総合センター農業試験場（岡山県赤磐郡山陽町；現：赤磐市）畑圃場内のナス栽培およびトマト栽培プラスチックハウス（各129 m²）、真庭郡久世町（現：真庭市）のナス栽培プラスチックハウス（245 m²）および川上郡川上町（現：高梁市）のトマト栽培プラスチックハウス（240

m²）で実験を行った。久世町はナスの、川上町はトマトの夏秋期の施設栽培を行っている産地である。各ハウスにはセイヨウオオマルハナバチの巣箱（幅25 cm、奥行き30 cm、高さ25 cm、ワーカー数約100頭、アグリセクト（株）社製、商品名：キャッツマルハナバチ；以下、全て同じ商品を使用）を1箱ずつ、ハウス内に設けた縦穴（40 cm×50 cm、深さ40 cm）内に設置した。巣箱に直射日光が当たることで巣箱の温度が高まるのを防ぐため、縦穴をワーカーの出帰巢用の開口部（40 cm×5 cm）を残して、発泡スチロール製の蓋（40 cm×60 cm、厚さ5 cm）で覆った。毎日夕方に給餌を行い、キャッツマルハナバチに添付の乾燥花粉約2 gを与えた。また、巣箱の底部には蜜液タンクを備えており、ワーカーは随時吸蜜が可能であった（以下、セイヨウオオマルハナバチへは全て同じ方法で給餌した）。ハウスの開口部には4 mm×4 mm目合いの透明ネット（ポリエチレン製、日本ワイドクロス（株）社製、商品名：アニマルネット）を張ってワーカーの逃亡を防いだ。コロニーの寿命の判定には、放飼開始日から5日間隔で開花中の花をランダムに20花調査し、バイトマークのない花の割合が50%以下になった日までをコロニーの寿命とする池田・忠内（1995）の方法を用いた。巣箱内の温度は、巣箱の上面の中心から10 cm下部の位置を測定した。

結果および考察

コロニーの寿命は、山陽町のナスのハウスで2000年7月3日から放飼したコロニーを除き、55~105日で概ね2か月以上であった（表1）。池田・忠内（1995）は秋期から冬期の抑制栽培トマトの異なった面積のハウ

表1 放飼15日間までの巣箱の温度とセイヨウオオマルハナバチのコロニーの寿命との関係

栽培作物名	試験年次	試験地	ハウス面積 (m ²)	放飼開始日	放飼15日後までの巣箱の温度 (°C)			コロニーの寿命 (日)
					平均±標準誤差	最高	最低	
トマト	1999	山陽町	129	6月 9日	25.3±4.6	35.2	16.5	60
トマト	2000	川上町	240	6月 7日	24.6±2.8	32.9	19.5	60
トマト	2000	川上町	240	7月29日	29.6±2.0	35.7	26.1	55
トマト	2000	山陽町	129	5月24日	25.0±4.6	33.3	17.0	55
ナス	1999	山陽町	129	5月19日	22.7±5.0	33.2	13.1	70
ナス	1999	山陽町	129	8月31日	27.0±2.5	33.4	21.0	80
ナス	2000	久世町	245	4月 5日	20.3±3.8	30.5	12.1	65
ナス	2000	久世町	245	6月 6日	28.1±3.6	33.4	19.3	60
ナス	2000	山陽町	129	4月25日	22.5±4.5	31.3	13.3	70
ナス	2000	山陽町	129	7月 3日	33.5±1.3	37.2	31.4	15
ナス	2000	山陽町	129	7月19日	32.4±1.2	36.1	30.3	105
ナス	2000	山陽町	129	9月18日	30.8±1.0	33.0	24.9	75

スに導入したセイヨウオオマルハナバチのコロニーの寿命を調査し、100 m³のハウスでは45日前後と短命であるが、面積が広くなるほど長くなり、800 m³の場合には60~70日となることを報告している。本実験では129~245 m³のハウスを用いて夏期から秋期に行ったにもかかわらず、7月3日から山陽町のナスに放飼したコロニーを除き、コロニーの寿命は池田・忠内（1995）の報告に比較して特に短くはなかった。7月3日から放飼した山陽町のナスハウスのコロニーの寿命は15日と短かったが、このコロニーを放飼した15日間の巣箱の平均温度は33.5±1.3℃、最高温度は37.2℃、最低温度は31.4℃であった。これ以外のコロニーのうち、放飼15日後までの巣箱の温度が最も高かったのは、7月19日から放飼した山陽町のハウスであり、その平均温度が32.4±1.2℃、最高温度が36.1℃、最低温度が30.3℃であった（表1）。しかし、そのハウスに放飼したコロニーの寿命は105日と長かった（表1）。これらの結果から、高温期でも巣箱内の平均温度を32℃以下に維持できれば、少なくとも約2か月間は訪花活動が行われると考えられる。ただし、ハウス内の気温が30℃を越えると訪花活動は行わぬが、訪花ワーカー数が減少する（池田・忠内、1992）ことから、巣箱1個で交配可能な花数は減少すると考えられる。

第2節 巣箱の高温対策

本章第1節で、巣箱の平均温度を32℃以下に維持すると、放飼したセイヨウオオマルハナバチコロニーの寿命を2か月以上維持できた。しかし、高温になるとワーカーが巣温を下げるための送風行動に専念するために（片山、2007）、巣箱設置場所の気温が30℃以上で訪花活動が低下し、35℃以上では停止する（池田・忠内、1992）。従って、訪花活動を維持するために昼の高温時も巣箱周囲の気温は30℃以下であることが望ましい。その高温対策としては施設全体の遮光が考えられるが、トマトやナスなどの果菜類では光合成量の低下による収量や果実品質の低下が懸念される。元来、セイヨウオオマルハナバチは温度変動の小さい地下に営巣する性質があり（片山、2007）、市販のセイヨウオオマルハナバチのコロニーの高温対策として、巣箱を地下に設置する方法が有効である（池田・忠内、1995；小出、1997）とされているが、施設内の気温と地下設置位置の気温との関係は明らかでない。そのため、生産者の一部は実際に巣箱の地下設置を行っているが、生産者間でコロニーの寿命や訪花活動のパラツ

キが大きく、高温期のセイヨウオオマルハナバチの利用が普及しない要因になっている。

地温は深いほど日変化が少なく、地下設置位置は深いほど昼の高温を回避しやすいと考えられることから、巣箱を地下に設置するための穴の深さと設置位置の温度の関係を検討した。

材料および方法

農業試験場内の雨除けプラスチックハウス内を掘削して縦穴（40 cm×50 cm、深さ60 cm）を設け、縦穴内の地下30 cm、10 cmおよび地上80 cmの気温を2001年8月23日から28日まで測定した。なお、縦穴の真上には、地上20 cmの位置に遮光ネット（幅1 m、長さ1 m、遮光率：75~80%、ダイオ化成（株）社製）を水平に張って遮光した。

結果および考察

いずれの測定位置の平均温度も同等で、27℃であったが、平均温度の標準誤差は地下30 cmが±1.7℃、地下10 cmが±2.7℃、地上80 cmが±5.2℃で、地下の気温変化は地上に比べて小さく、地下では深い方が小さかった（表2）。最高気温は地下30 cmが29.6℃、地下10 cmが32.0℃、地上80 cmが37.9℃で、地下の最高気温は地上に比べて低く、地下30 cmの最高気温は、ハウス内の地上80 cmの気温が38℃まで上昇しても30℃以下であった（表2）。この結果から、巣箱の中心部が地下30 cmの位置になるように設置すると、ハウス内の最高気温が38℃程度に上昇しても、巣箱周囲の気温を30℃以下に維持できると考えられる。そのため、本研究におけるセイヨウオオマルハナバチの高温期の放飼実験は、いずれも巣箱を深さ60 cmの縦穴に設置することにした。ただし、これはハウス内の平均気温が27℃での結果のため、平均気温がより高い場合に巣箱周囲の気温を30℃以下に保つためには、さらに地下の深い位置に巣箱を設置する必要があると考えられる。

表2 ハウス内の測定位置別の温度

測定位置	ハウス内の温度 (°C) ^z		
	平均±標準誤差	最高	最低
地上80 cm	27.0±5.2	37.9	18.7
地下10 cm	26.8±2.7	32.0	21.1
地下30 cm	26.9±1.7	29.6	22.6

^z 2001年8月23日から28日までの平均値

第2章 セイヨウオオマルハナバチの利用

第1節 トマトの雨除け栽培での利用

冬春期のトマトの施設栽培では、花粉媒介昆虫としてセイヨウオオマルハナバチが広く利用されている(農林水産省生産局野菜課, 2005)。しかし、第2章で述べたように、栽培期間の大半が高温期に当たる夏秋期の雨除け栽培では、セイヨウオオマルハナバチが寒地系の昆虫で高温に弱いことから、利用は困難であると考えられていたが、巣箱の地中埋設や市販の巣箱冷却装置の開発によってコロニーの維持は雨除け栽培でも可能になってきた(池田・忠内, 1995; 小出, 1997)。ところが、高温条件下ではトマトの花粉の発芽率が低下する(池田・忠内, 1995)のために、虫媒受粉による着果は不安定になる。そこで、気温が稔性花粉の生成量に及ぼす影響を解析するとともに、稔性花粉重量と着果率との関係を検討し、夏秋期の雨除け栽培において高温限界からみたセイヨウオオマルハナバチを利用できる地域の判別を試みた。

材料および方法

1. 実験区

農業試験場内(129 m²)、小田郡美星町(現:井原市)(300 m²)および川上郡川上町(現:高梁市)(210 m²)の各雨除けプラスチックハウスに定植したトマト(品種:桃太郎8)を用いて実験した。定植日は農業試験場が2001年5月29日、美星町が5月25日、川上町が5月20日、いずれの調査場所も6~7葉展開期のトマト苗を植え付けた。各ハウスにはセイヨウオオマルハナバチの巣箱を1個ずつ導入した。導入日は山陽町が6月20日、美星町が7月24日、川上町が6月8日であった。山陽町では7月18日および9月5日、川上町では7月14日に巣箱の更新を行い、美星町では更新しなかった。ハウス内に設けた縦穴(40 cm×50 cm、深さ60 cm)内に巣箱を設置し、第2章第1節と同様にワーカーの出帰巢用の開口部を残して、発泡スチロール製の蓋で縦穴を覆った。ワーカーへの給餌や開口部の逃亡防止用ネットの展張も第2章第1節と同様に行った。

2. 調査方法

花粉重量と花粉の発芽率を調査するため、7月8日、7月18日、8月8日、8月20日、8月29日および9月10日にそれぞれ開花当日の花を各調査場所から無作為に10花ずつ採集した。採集した1花当たり2葯ずつ計20葯をシャーレ(直径5 cm、深さ0.8 cm)に入れて蓋をせずに

オートドライデシケーター(幅29 cm、奥行29 cm、高さ49 cm、アズワン(株)社製;以下、採集した葯の乾燥には全て同じものを使用した)内で相対湿度を30%以下、気温を25~28℃に設定して16時間乾燥させた後、シャーレに蓋をして2分間手で強く素早く振り、葯から花粉を取り出し、花粉重量を測定した。発芽率の調査には、藤下(1981)の培地(しよ糖100 g、ホウ酸10 mg、寒天8 gを蒸留水1 Lに加熱して溶解させた)を用いた。この培地を5 mmの深さになるようシャーレの底に流し込み、冷却して固化させた。重量を測定した花粉をカバーガラス(1辺の長さ18 mm、厚さ0.12~0.17 mm)の1辺に付着させ、シャーレ内の10か所に置床し、25℃恒温条件下の全暗で24時間培養して花粉の発芽率を調査した。発芽率の調査は生物顕微鏡を用いて行い、1視野(直径1.8 mm)中における全花粉粒数と発芽花粉粒数を計数した。稔性花粉重量は下式により推定した。

$$\text{稔性花粉重量} = \text{花粉重量} \times \text{発芽花粉粒数} / \text{全花粉粒数}$$

山陽町と川上町では7月8日、7月18日、8月8日、8月20日および9月10日に、美星町では8月20日および9月10日に、ハウス中央部の連続する10株の第1果がピンポン球大の果房を対象に着果率の調査を行った。

各ハウス中央部の高さ1 mの位置にサーミスタセンサーを設置したデータロガーを用いて30分間隔で気温を測定した。

結果および考察

稔性花粉重量に及ぼす開花前の気温の影響を明らかにするために、トマトの花芽分化開始期とされる開花30日前(藤井・鈴木, 1943)から開花前日までの期間におけるハウス内の平均気温、最高気温または最低気温を独立変数、1葯当たりの稔性花粉重量を従属変数として単相関係数を算出した(表3)。その結果、いずれの期間も相関係数は負の値を示した。また、稔性花粉重量と平均気温との相関は、最高気温および最低気温との相関に比べて高かった。開花前10日間の平均気温と稔性花粉重量との相関係数は-0.72 ($p < 0.001$)で、開花前5日間の-0.67 ($p < 0.005$)、開花前20日間の-0.68 ($p < 0.005$)および開花前30日間の-0.56 ($p < 0.01$)に比べて相関が高かった。開花6日前から20日前までの期間を5日間隔で区切って比較すると、開花6日前から10日前までの5日間の平均気温と稔性花粉重量の相関が最も高く、相関係数は-0.72 ($p < 0.001$)で開花前10日間の平均気温と同等であった(表3)。

表3 雨除け栽培トマトの稔性花粉重量と開花前の期間別の気温との相関係数

開花前の期間 (日)	平均気温	最高気温	最低気温
1~5	-0.67**	-0.55*	-0.53*
1~10	-0.72***	-0.59**	-0.69**
1~20	-0.68**	-0.52*	-0.61**
1~30	-0.56*	-0.37	-0.48*
6~10	-0.72***	-0.60**	-0.66**
11~15	-0.62**	-0.48*	-0.43
16~20	-0.28	-0.14	-0.22

有意水準 (両側検定) *: 5%, **: 1%, ***: 0.1%, n = 18

藤井・鈴木 (1943) はトマトの花芽の発育時間を調べ、花芽分化は開花30日前ごろに始まり、開花10日前ごろに花粉母細胞が認められ、開花3~4日前には花粉粒の形成が完了することを明らかにした。開花の6~10日前は花粉の形成期にほぼ一致することから、この時期の高温が花粉形成に悪影響を及ぼし、稔性花粉重量が減少したと考えられる。

各調査地での花粉採集日に花弁が萎凋し始めた花を10花ずつ調査したところ、ほぼ100%にバイトマークが認められた (データ省略) ことから、セイヨウオオマルハナバチはほぼ全ての花を訪花していたと考えられる。

稔性花粉重量と着果率との関係を河野・杉野 (1958) のモデル式 (下式: 以下、河野・杉野式とする) に当てはめ、非線形最小二乗法によって定数を推定した。

$$p = 1 - \exp(-am^b)$$

ここで、 p は着果率 (%), m は1葯当たり稔性花粉重量 (μg), a と b は正の定数を示す。両者の関係は河野・杉野式によく適合し、定数は $a=0.781$, $b=0.360$ と推定された (図1)。河野・杉野式を対数変換すると、 $\log_{10} \{-\ln(1-p)\} = \log_{10} 0.781 + 0.360 (\log_{10} m)$

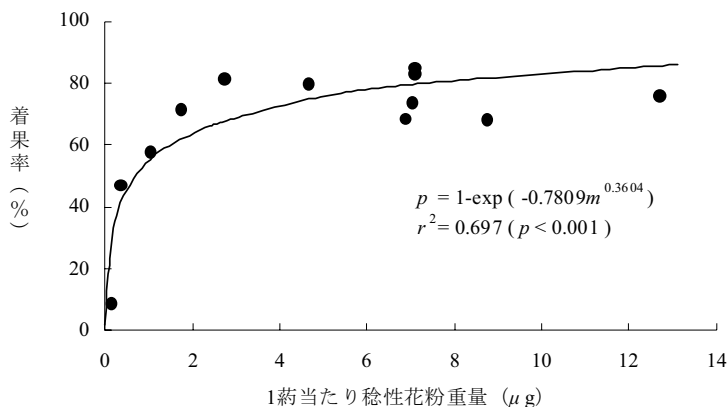


図1 雨除け栽培トマトの稔性花粉重量と着果率の関係

となるので、 $\log_{10} \{-\ln(1-p)\}$ を独立変数、 $\log_{10} m$ を従属変数として直線回帰分析を行ったところ、有意で高い正の相関関係 ($r^2 = 0.697$, $p < 0.001$) が得られた。また、開花6~10日前の平均気温を独立変数、稔性花粉重量を従属変数として求めた回帰式は $y = -1.185x + 34.952$ となり、有意で高い負の相関関係 ($r^2 = 0.518$, $p < 0.001$) が認められた (図2)。

夏秋期の主要品種である‘桃太郎8’の1花房当たり花数は5~6花であり、果重は210~220 gとされている (畠中, 1993)。岡山県農林水産部 (2006) によると、夏秋トマト雨除け栽培の10a当たりの標準的な可販果収量は10 t、定植株数は2080~2200株である。通常、1株当たり10~13果房着生させるので、10 tの可販果収量を得るために必要な最低着果率は、1果房当たり1.6~2.3果になる。形状不良などで販売不可となる果実の発生を見込むと、実際に必要な最低着果率は1果房当たり3果程度とするのが妥当であろう。従って、10 a当たり10 t以上の可販果収量を得るためには、平均着花数を5花とすると、60%以上の着果率が必要と考えられる。

図1に示した回帰式から推定すると、1葯当たり稔性花粉重量が1.558 μg の場合に着果率が60%になる。

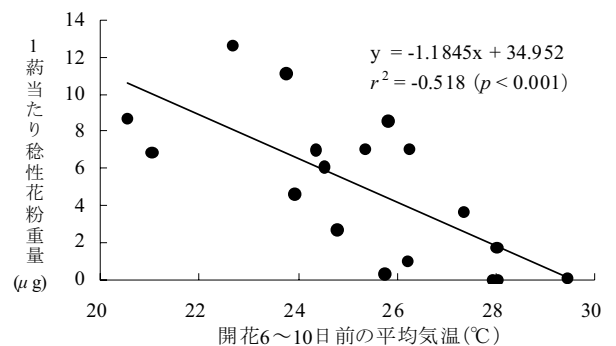


図2 雨除け栽培トマトの開花6~10日前の平均気温と稔性花粉重量の関係

従って、セイヨウオオマルハナバチによる受粉では、1葯当たり稔性花粉重量が約1.6 μg 以上必要と考えられる。次に、図2の回帰式に独立変数の気温を代入して稔性花粉重量を推定すると、1.6 μg 以上の稔性花粉重量を得るには、気温が28.1°C以下でなければならず、逆に29.5°C以上になると稔性花粉がほぼ無くなると推定された。このことから、開花6~10日前のハウス内の平均気温が28°C以下の時期および地域でセイヨウオオマルハナバチの利用が可能と考えられる。

第2節 ナスの雨除け栽培での利用

ナスは自然状態では虫媒または風媒によって受粉し、着果・結実する。夏秋期の露地栽培では訪花昆虫や風によって安定した着果が期待できるため、着果促進のための特別な処理を行わないのが一般的である。施設栽培においても、夏秋期は施設の側窓を開放して栽培するため、露地栽培と同様に着果処理を行わない場合が多い。夏秋期の施設栽培では露地栽培に比べて着果が不安定であるが、その原因が着果処理の省略なら、花粉媒介昆虫の利用で着果が安定化する可能性がある。そこで、夏秋期の施設栽培ナスにおけるセイヨウオオマルハナバチの受粉効果を確認するため、慣行の着果処理用薬剤である化学合成ホルモン剤のパラクロロフェノキシ酢酸液剤（商品名：トマトーン；以下、成分名の略称である4-CPAを用いる）処理とセイヨウオオマルハナバチ放飼処理との効果を比較した。

材料および方法

1. 実験区

農業試験場内の雨除けプラスチックハウス（129 m^2 ：幅6.0 m，奥行21.5 m，高さ3.2 m）内に定植したナス（品種：‘千両2号’，台木品種：‘トレロ’）を用いて実験した。2001年4月7日にハウス内に第1花房開花期のナスの苗を株間75 cm，条間2 m，1条植えて24株ずつ3列に計72株定植し、セイヨウオオマルハナバチを放飼した。3列のうちハウスサイド側の1列を8

株ずつに3等分し、マルハナバチ区、4-CPA区および対照区とした。4-CPA区および対照区（両区とも幅2.0 m，長さ6.0 m，高さ1.8 m）を4 mm \times 4 mm目合いの透明ネット（第2章第1節と同じ）で囲んだ。ワーカーの逃亡を防ぐためにハウスの開口部を4 mm \times 4 mm目合いの透明ネットで覆ったが、4-CPA区および対照区の側面部分は外部からの訪花昆虫の侵入の障害になることを避けるためにネットで塞がなかった。5月24日から11月10日までの170日間、ハウス内にセイヨウオオマルハナバチの巣箱1箱を設置した。7月24日および9月12日に巣箱を更新した。セイヨウオオマルハナバチは本実験のような小面積で自由に訪花させると過剰訪花して花柱や子房を傷つけ、これが果形不良や落花を招くことから、2~3日に1回午前9時から30分間出入り口を開放した後、出口を閉めた後1時間以内にハウス内のワーカーを回収し、これ以外の時間は出口を閉めた（以下、特に記述しない限り、セイヨウオオマルハナバチは同じ方法で放飼した）。

各区とも8株ずつを調査対象株とした。仕立て方法はV字4本主枝仕立てとした（以下、ナスの仕立て方法は全て同じ）。肥料は菜種油粕を用い、1株当たりの施肥量をNが62 g， P_2O_5 が23 g， K_2O が12 gとした。4-CPA区では2~3日間隔で4-CPA50倍希釈液を開花花房に散布した。

2. 調査方法

6月4日から11月26日まで収穫調査を行った。週2回収穫を行い、60 g以上の果実を収穫し個数と重量を測定した。石ナス等の肥大が極めて遅い果実については重量に関係なく、確認しだい収穫した。石ナス、曲がり、首細、奇形、変形などで商品価値のないものを形状不良果とした。全収穫果に対する形状不良果の個数割合を形状不良果率とした。

結果および考察

株当たりの正常果収量はマルハナバチ区が17.5 kg、

表4 セイヨウオオマルハナバチによる受粉が雨除け栽培ナスの正常果収量および形状不良果率に及ぼす影響

区名	正常果収量 (kg/株)	形状不良果率 (%)
マルハナバチ	17.5 a	5.4 a
4-CPA	16.0 a	6.9 a
無処理	7.4 b	35.5 b

同一列の異なる英文字間にはTukeyの多重検定により、5%水準で有意差がある形状不良果率は逆正弦変換後に検定した

4-CPA区が16.0 kg, 対照区が7.4 kgで, マルハナバチ区および4-CPA区は対照区に比べて有意に多く ($p < 0.05$), マルハナバチ区と4-CPA区の間には有意差は認められなかった ($p > 0.05$) (表4). 形状不良果率はマルハナバチ区が5.4%, 4-CPA区が6.9%, 対照区が35.5%で, マルハナバチ区および4-CPA区は対照区に比べて有意に低く ($p < 0.05$), マルハナバチ区と4-CPA区の間には有意

差は認められなかった ($p > 0.05$) (表4).

以上の結果から, 雨除け栽培におけるセイヨウオオマルハナバチによる受粉で, 慣行の4-CPA溶液の散布処理と同等の着果促進効果が認められ, 夏秋期の施設栽培ナスにおけるセイヨウオオマルハナバチの受粉効果が確認された.

第3章 セイヨウミツバチの利用

第1節 トマトの半促成栽培での利用

セイヨウミツバチは蜜を持たないトマトの花に野外では訪花しない（松浦，1998）が，閉鎖された施設内では訪花する（浅田，1998）．しかし，トマトに対するセイヨウミツバチの受粉効果についての報告は極めて少ない（Banda and Paxton，1991）．そこで，セイヨウミツバチをセイヨウオオマルハナバチの代替花粉媒介昆虫として利用する可能性を検討した．

材料および方法

1. 実験区

農業試験場内のプラスチックハウス（129 m³：幅6.0 m，奥行21.5 m，高さ3.2 m）内に定植したトマト（品種：ハウス桃太郎）を用いて実験した．ハウスには2 mm × 4 mm目合いの透明ネット（ポリエチレン製，日本ワイドクロス（株）社製，商品名：アニマルネット）をハウス中央に端と平行に設置して64.5 m²（6 m × 10.5 m）ずつに等分した区画を設け，それぞれの区画をミツバチ区およびマルハナバチ区とした．ハウスの開口部も同じネットで全て塞いだ．また，対照として1週間隔で両区の1番花開花直前の10花房ずつを選び，その花房の全花が開花終了するまで2 mm × 4 mm目合いの透明ポリエチレン製網袋を被せてワーカーの訪花を防ぐ実験区を設けた．

ミツバチ区にはセイヨウミツバチの巣箱（ワーカー数約8000頭，アピ（株）社製，商品名：らくらく交配8000；以下，全て同じ商品を使用した），マルハナバチ区にはセイヨウオオマルハナバチの巣箱を1箱ずつ，ともに2006年4月28日に設置した．セイヨウミツバチでは巣箱の更新を行わず，セイヨウオオマルハナバチでは6月1日と8月3日に更新した．

セイヨウミツバチには2～3日間隔で蜂蜜50%水溶液50 mlおよび乾燥花粉5 gを与え（以下，セイヨウミツバチには全て同じ方法で給餌した），薬剤散布時を除いて巣箱の出入り口を終日開放とした．

3月17日に6葉展開期の苗を株間30 cm，条間1.2 m，1条植えて3列に定植し，ミツバチ区，マルハナバチ区ともに81株ずつ供試した．仕立て方法は直立Uターン仕立て（以下，トマトの仕立て方法は全て同じ）とした．施肥には化成肥料を用い，1株当たりの施肥量をNが44 g，P₂O₅が40 g，K₂Oが89 gとした．定植日から5月

24日まで最低気温15℃以上になるように加温した．

2. 調査方法

(1) 果実調査

ワーカーが訪花を開始した日以降に開花した花が収穫期に達した6月26日から8月28日まで収穫調査を行った．着色した果実は毎週2回収穫して果実重を測定した．空洞果，乱形果，窓あき果などの形状不良果を除いたものを正常果収量とした．着果率は果房毎の開花数と着果数から算出した．各区の着色した正常果5果について，週1回種子数を調査した．

(2) 採粉重量および採粉時間の調査

花卉裂開期に1 mm × 1 mm目合いの透明ポリエチレン製網袋を被せてワーカーの訪花を防ぎ，花卉が十分展開した花卉裂開4日後の5月22日に網袋を除去し，セイヨウミツバチとセイヨウオオマルハナバチが未採粉花へ最初に訪花した時（以下，初回採粉時とする）の採粉時間を20花ずつ目視により測定した．初回採粉時間は，ワーカーが調査対象の花を訪れてから次の花へ飛び去るまでの時間とした．この間，ワーカーはしばしば花の前でのホバリング（空中静止）飛翔を行ないつつ，同一花に繰り返し訪花する行動が見られた．

網袋の除去直後に採取した葯（未採粉葯）および初回採粉後直ちに採取した葯（初回採粉後葯），それぞれ10花40葯について花粉重量を測定した．花粉重量の測定には第2章第1節の花粉重量の測定方法を用いた．未採粉葯の花粉重量と初回採粉後の葯の花粉重量との差を初回訪花時の採粉重量とした．また，訪花が認められた花について，5月12日，22日，6月19日，26日，7月3日，10日に花卉が萎凋し，落花寸前となった葯（落花寸前葯），それぞれ10花40葯について，上述の方法で花粉重量を測定した．未採粉葯の花粉重量と落花寸前葯の花粉重量との差を開花終了時の採粉重量とし，未採粉葯の花粉重量に対する開花終了時の採粉重量の比率を開花終了時の採粉率とした．落花寸前葯の5回の調査日に花卉が萎凋し，落花寸前となったそれぞれ10花についてバイトマークの有無で訪花・未訪花を区別し，訪花率を算出した．

結果および考察

セイヨウオオマルハナバチは放飼開始当日から訪花を始めたが，セイヨウミツバチは放飼開始1週間後から訪花を始めた．初回採粉時の1葯当たり採粉重量は，ミツバチ区が28 μg，マルハナバチ区が123 μgで，ミツバチ区はマルハナバチ区に比べて初回採粉重量が有意に少なかった（ $p < 0.05$ ）（表5）．同様に初回訪花時

表5 半促成栽培トマトにおけるセイヨウミツバチおよびセイヨウオオマルハナバチの初回採粉時の採粉重量、採粉率および採粉時間

ポリネーター	1葯当たり採粉重量 (μg)	採粉率 (%)	採粉時間 (秒)
ミツバチ	28	18.8	88
マルハナバチ	123	71.0	31
有意性 ²	*	*	*

²採粉重量および採粉時間は分散分析、採粉率は χ^2 検定により、* : 5%水準で有意差がある

表6 半促成栽培トマトにおけるセイヨウミツバチおよびセイヨウオオマルハナバチの訪花率および開花終了時の採粉率

ポリネーター	訪花率 (%)	開花終了時採粉率 (%)
ミツバチ	67.5	76.9
マルハナバチ	100	81.3
有意性 ²	*	n.s.

² χ^2 検定により、* : 5%水準で有意差があり、n.s. : 有意差がない

表7 セイヨウミツバチおよびセイヨウオオマルハナバチによる受粉が半促成栽培トマトの着果率および収量に及ぼす影響

ポリネーター	着果率 (%)	正常果収量 (kg/株)
ミツバチ	69.0	4.14
マルハナバチ	75.7	4.52
有意性 ²	*	*

²正常果率は χ^2 検定、収量は分散分析により、* : 5%水準で有意差がある

表8 セイヨウミツバチおよびセイヨウオオマルハナバチによる受粉が半促成栽培トマトの種子数 および 正常果重に及ぼす影響

ポリネーター	1果当たり種子数 (粒)	正常果重 (g/箇)
ミツバチ	122b	157b
マルハナバチ	144a	168a
対照	52c	60c

同一列の異なる英文字間にはTukeyの多重検定により、5%水準で有意差がある

の採粉率は、ミツバチ区が18.8%、マルハナバチ区が71.0%で、ミツバチ区はマルハナバチ区に比べて初回訪花時の採粉率が有意に低かった ($p < 0.05$) (表5)。逆に、初回訪花時の採粉時間は、セイヨウミツバチが88秒、セイヨウオオマルハナバチが31秒で、前者は後者に比べて初回訪花時の採粉時間が有意に長かった ($p < 0.05$) (表5)。これらの結果から、トマトに対するセイヨウミツバチの採粉効率は、セイヨウオオマルハナバチに比べて顕著に低いと考えられた。ワーカーの訪花

が認められた花の開花終了時の採粉率は、ミツバチ区が76.9%、マルハナバチ区が81.3%で有意差は認められなかった ($p > 0.05$) (表6)。しかし、訪花率はマルハナバチ区が100%であったのに対し、67.5%と有意に低かった ($p < 0.05$) (表6)。このため、着果率はミツバチ区が69.0%、マルハナバチ区が75.7%で、ミツバチ区はマルハナバチ区よりも有意に低かった ($p < 0.05$) (表7)。また、株当たりの正常果収量はミツバチ区が4.1kg、マルハナバチ区が4.5kgで、ミツバチ区はマルハナバチ区に比べて有意に少なかった ($p < 0.05$) (表7)。種子数はミツバチ区が122粒、マルハナバチ区が144粒、

対照区が52粒で、ミツバチ区は、対照区に比べて有意に多かったが、マルハナバチ区よりも有意に少なかった ($p < 0.05$) (表8)。トマトの果実の大きさは、1果当たりの種子数と高い正の相関を示す (寺林・矢澤, 2003)。本実験でも、ミツバチ区の正常果1果重が157 g、マルハナバチ区が168 g、対照区が60 gで、ミツバチ区は対照区に比べて重かったが、マルハナバチ区に比較して有意に軽かった ($p < 0.05$) (表8)。

これらのことから、対照区に比べるとセイヨウミツバチの受粉効果は認められたが、セイヨウオオマルハナバチに比べると採粉効率および訪花率が劣ったために、正常果収量は少なく、1果重は軽くなったと考えられる。本実験は64.5 m²のハウス当たりワーカー数約8000頭の巣箱1箱を配置して実施した。しかし、営利栽培では本実験と同等の高密度放飼は導入コストが高いため困難で、より低密度での利用になると考えられ、セイヨウミツバチの受粉効果はさらに低下すると推察される。このため、トマト栽培におけるセイヨウオオマルハナバチの代替花粉媒介昆虫としてのセイヨウミツバチの利用は困難と考えられる。

第2節 ナスの促成栽培での利用

本章第1節で述べたトマトと同様に、蜜を持たないナスの花にもセイヨウミツバチは訪花する。実際に高知県や愛知県の促成栽培ナスの産地では、花粉媒介昆虫の導入面積当たりの単価が安いセイヨウミツバチの利用が試みられたが、冬期には効果が不安定なことから普及していない。このため、ナスの促成栽培でのセイヨウミツバチ利用に関する報告は森田 (2002) による高知県の一部産地での事例紹介があるだけで、花粉媒介能力や採粉行動は明らかでない (宮本ら, 2006, 2007)。そこで、セイヨウミツバチによる受粉が促成栽培ナスの収量および果実形状に及ぼす影響をセイヨウオオマルハナバチと比較した。

材料および方法

1. 実験区

農業試験場内の本章第1節と同形状のプラスチックハウス内に定植したナス (品種: '千両', 台木品種: '台太郎' または 'トレロ') を用いて実験した。本章第1節と同じ方法でハウスを仕切り、2等分した区画を設け、それぞれの区画をミツバチ区およびマルハナバチ区とした。2002年10月16日にミツバチ区にはセイヨウミツバチの巣箱、マルハナバチ区にはセイヨウオオマルハナバチの巣箱を各区中央の高さ40 cmの台

の上に1箱ずつ設置した。セイヨウミツバチでは巣箱の更新を行わず、セイヨウオオマルハナバチでは12月19日、2月5日、3月24日および5月8日に行った。

ナスは9月11日に第1花房開花期の苗を株間75 cm、条間1.8 m、1条植えて3列に定植し、台木品種間での正常果収量、上物果および形状不良果の割合を比較するため、両区にはそれぞれ '台太郎' 台および 'トレロ' 台のナスを6株ずつ3反復で供試し、計36株定植した。加温設定温度を15℃とし、28℃以上になると換気扇が作動するように設定した。施肥は大塚化学製養液土耕2号および5号を用い、液肥で1日1~2回施用した。1株当たりの施用量はNが52 g、P₂O₅が52 g、K₂Oが91 gであった。

2. 調査方法

(1) 果実調査

第2章第2節と同じ方法で2002年11月18日から2003年6月23日まで果実の調査を行った。収穫した正常果のうち、岡山県農林水産部(1986)の岡山県青果物出荷規格によって秀品に判定されるものを上物とし、全収穫果に対する上物果の個数割合を上物率とした。

(2) 稔性花粉重量調査

開花前日に1 mm × 1 mm目合いの透明ポリエチレン製網袋を被せてワーカーの訪花を防ぎ、開花当日に両区とも台木品種別にそれぞれ5花から2葯ずつ計10葯を採取し、第2章第1節の方法で花粉重量と稔性花粉重量を求めた。11月3日から6月10日まで約15日間隔で計15回、葯を採取した。また、稔性花粉重量と着果率および形状不良果率の関係を明らかにするため、上記とは別に各葯採取日に開花した花について、両区とも台木品種別にそれぞれ8花の着果率と形状不良果率を調査した。着果率と形状不良果率の調査は、外観の健全な中花柱花または長花柱花について行った (以下、促成栽培ナスの着果率と形状不良果率の調査は全て同様)。

(3) 採粉時間と採粉重量調査

6月19日および23日に開花した花を調査した。前項の稔性花粉重量調査と同様に事前に網袋を被せた花を対象にし、開花当日に網袋を除去し、セイヨウミツバチとセイヨウオオマルハナバチの初回採粉時の採粉時間を6花ずつ目視により測定した。採粉重量の測定は初回採粉後直ちに採取した葯 (初回採粉後葯)、袋の除去2日後に採取した葯 (開花2日後葯)、袋の除去直後に採取した葯 (未採粉葯) それぞれ30葯について実施した。花粉重量は第2章第1節の方法で測定し、未採粉葯の花粉重量と採粉後葯の花粉重量との差を採粉重量とした。

結果

ミツバチ区、マルハナバチ区ともに実験期間中のほぼ全花にバイトマークが認められた。株当たりの正常果収量では、ミツバチ区の‘台太郎’台が19.1 kg, ‘トレロ’台が18.4 kg, マルハナバチ区の‘台太郎’台が20.1 kg, ‘トレロ’台が19.1 kgで、ミツバチ区では両台木品種ともにマルハナバチ区に比べて有意に少なかった ($p < 0.05$) (表9)。上物率では、ミツバチ区の‘台太郎’台が30.1%, ‘トレロ’台が20.5%, マルハナバチ区の‘台太郎’台が40.0%, ‘トレロ’台が36.3%で、ミツバチ区では両台木品種ともにマルハナバチ区に比べて有意に低かった ($p < 0.01$) (表9)。形状不良果率では、ミツバチ区の‘台太郎’台が8.9%, ‘トレロ’台が13.4%, マルハナバチ区の‘台太郎’台が8.6%, ‘トレロ’台が10.6%で、ミツバチ区では両台木品種ともにマルハナバチ区に比べて有意に高かった ($p < 0.05$) (表9)。台木品種間では、両区ともに‘台太郎’台は‘トレロ’台に比べて、正常果収量が多く ($p < 0.05$)、上物率が高く ($p < 0.05$)、形状不良果率は有意に低かった ($p < 0.01$) (表9)。形状不良果率を月別に比較すると、マルハナバチ区は8~11%と常に低く安定していたが、ミツバチ区での12~5月の形状不良果率は1月の16%を最高にマルハナバチ区よりも高かった (図3)。

セイヨウミツバチの初回採粉時の採粉時間は275秒で、セイヨウオオマルハナバチの71秒に比べて有意に長かった ($p < 0.01$) (表10)。ミツバチ区の初回採粉時の1葯当たり採粉重量は0.04 mgで、マルハナバチ区の0.35 mgに比べて有意に少なく ($p < 0.05$)、開花2日後までの採粉重量でもミツバチ区が0.16 mg, マルハナバチ区が0.42 mgで、ミツバチ区はマルハナバチ区に比べて有意に少なかった ($p < 0.05$) (表10)。

11月18日開花の花の1葯当たり稔性花粉重量は、‘台太郎’台が0.36 mg, ‘トレロ’台が0.35 mgで、5月14日開花の花では‘台太郎’台が0.72 mg, ‘トレロ’台が0.62 mgであった。これらの花における1果当たりの種子数は、11月18日開花ではミツバチ区の‘台太郎’台が329粒, ‘トレロ’台が780粒, マルハナバチ区の‘台太郎’台が1214粒, ‘トレロ’台が1234粒で、両台木品種ともにミツバチ区ではマルハナバチ区に比べて有意に少なかった ($p < 0.05$) (表11)。5月14日開花ではミツバチ区の‘台太郎’台が1230粒, ‘トレロ’台が1311粒, マルハナバチ区の‘台太郎’台が1452粒, ‘トレロ’台が1527粒で、両台木品種ともにミツバチ区とマルハナバチ区の間有意差は認められなかった ($p > 0.05$) (表11)。

1葯当たり稔性花粉重量と着果率との関係を図4に、形状不良果率との関係を図5に示した。1葯当たり稔性花粉重量が減少すると、0.5~0.6 mgを境にミツバチ区

表9 セイヨウミツバチおよびセイヨウオオマルハナバチによる受粉が台木品種の異なる促成栽培ナスの収量、上物率および形状不良果率に及ぼす影響

ポリネーター	台木	正常果収量(kg/株)	上物率 (%)	形状不良果率 (%)
ミツバチ	‘台太郎’	19.1	30.1	8.9
	‘トレロ’	18.4	20.5	13.4
マルハナバチ	‘台太郎’	20.1	40.0	8.6
	‘トレロ’	19.1	36.3	10.6
有意性 ^Z	ポリネーター間	*	**	*
	台木間	*	*	**
	交互作用	n.s.	n.s.	n.s.

^Z分散分析により, *, **: 5%, 1%の水準で有意差があり, n.s.: 有意差がない

表10 促成栽培ナスにおけるセイヨウミツバチおよびセイヨウオオマルハナバチの採粉重量と初回採粉時間

ポリネーター	1葯当たり採粉重量 (mg)		初回採粉時間 (秒)
	初回採粉後	開花2日後	
ミツバチ	0.04	0.16	275
マルハナバチ	0.35	0.42	71
有意性 ^Z	*	*	**

^Z分散分析により, *, **: 5%, 1%の水準でそれぞれ有意差がある

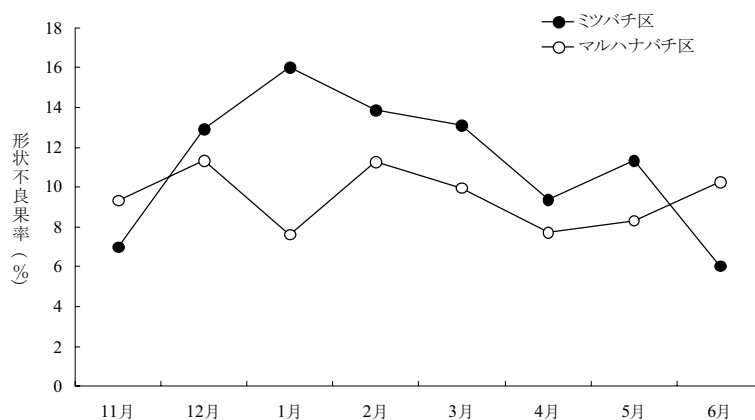


図3 セイヨウミツバチおよびセイヨウオオマルハナバチによる受粉が促成栽培ナスの月別の形状不良果発生率に及ぼす影響

表11 セイヨウミツバチおよびセイヨウオオマルハナバチによる受粉が台木品種の異なる促成栽培ナスの種子数に及ぼす影響

ポリネーター	台木	1果当たり種子数	
		11月18日	5月14日
ミツバチ	‘台太郎’	329	1230
	‘トレロ’	780	1311
マルハナバチ	‘台太郎’	1214	1452
	‘トレロ’	1238	1527
	ポリネーター間	*	n.s.
有意性 ²	台木間	n.s.	n.s.
	交互作用	n.s.	n.s.

1葯当たり花粉重量および稔性花粉重量は、11月18日の‘台太郎’が0.80 mgおよび0.36 mg, ‘トレロ’台が0.70 mgおよび0.35 mg, 5月14日の‘台太郎’が1.05 mgおよび0.72 mg, ‘トレロ’台が1.05 mgおよび0.62 mgであった

²分散分析により, *: 5%水準で有意差があり, n.s.: 有意差がない

表12 稔性花粉重量の多少がセイヨウミツバチおよびセイヨウオオマルハナバチによって受粉した促成栽培ナスの着果率および形状不良果率に及ぼす影響

ポリネーター	着果率 (%)		形状不良果率 (%)	
	花粉多	花粉少	花粉多	花粉少
ミツバチ	100	91.6	2.6	21.9
マルハナバチ	100	97.9	2.6	4.9
有意性 ²	n.s.	*	n.s.	**

花粉多は1葯当たり稔性花粉重量が0.6 mg以上, 花粉少は0.6 mg未満を示す

²χ²検定により, *, **: 5, 1%の水準で有意差があり, n.s.: 有意差がない

の着果率は低下し, 形状不良果率が高まった. 1葯当たり稔性花粉重量が0.6 mg未満での着果率および形状不良果率は, それぞれミツバチ区が91.6%および21.9%, マルハナバチ区が97.9%および4.9%で, ミツバチ区はマルハナバチ区に比べて着果率が有意に低く ($p < 0.05$), 形状不良果率が有意に高かった ($p < 0.01$)

(表12). 稔性花粉重量が0.6 mg以上では, ミツバチ区, マルハナバチ区ともに着果率が100%, 形状不良果率が2.6%で, ミツバチ区とマルハナバチ区の間には有意差は認められなかった ($p > 0.05$) (表12). なお, 両台木品種の1葯当たりの稔性花粉重量はともに0.48 mgで有意差はなく, 開花時期による品種間の違いもなかつ

た。

考 察

ミツバチ区はマルハナバチ区に比べて正常果収量が少なく、上物率が低く、形状不良果率が高かった(表9)。このように花粉媒介昆虫の違いで正常果収量、上物率および形状不良果率が異なる原因は、柱頭への花粉の受粉量が異なった結果、種子数が異なったためと考えられた。そこで、開花2日後までの採粉率を比較すると、セイヨウミツバチはセイヨウオオマルハナバチに比べて有意に低かった(表6)。また、セイヨウミツバチは葯内の花粉量が多い場合、葯の先端を口吻や前足で揺らしながら花粉を落とし、腹面の体毛で受け止めて採粉するが、花粉量が少ないと口吻を伸ばして葯の開口部付近に露出している花粉をつついて集める

(宮本ら, 2007)。そのため、花粉量が少ない場合には採粉量当たりの受粉率が低下すると考えられる。このセイヨウミツバチの受粉効率の低さは、稔性花粉重量が少ない場合の1果実当たりの種子数がセイヨウオオマルハナバチに比べて少なかったことから支持される(表11)。

以上のようにセイヨウミツバチはセイヨウオオマルハナバチに比べてナスの受粉効率が悪いので、稔性花粉量が少ない場合には受精できる種子数が少なくなり、着果率の低下や形状不良果率の上昇が生じると考えられる。従って、受粉にセイヨウミツバチを利用する場合、セイヨウオオマルハナバチより多量の稔性花粉量を確保しながら栽培する必要がある。

ナスの促成栽培でセイヨウオオマルハナバチの利用についてのこれまでの研究(三原ら, 1995; 前田ら, 1997; 串間ら, 1999)では、最低気温が収量、果実外

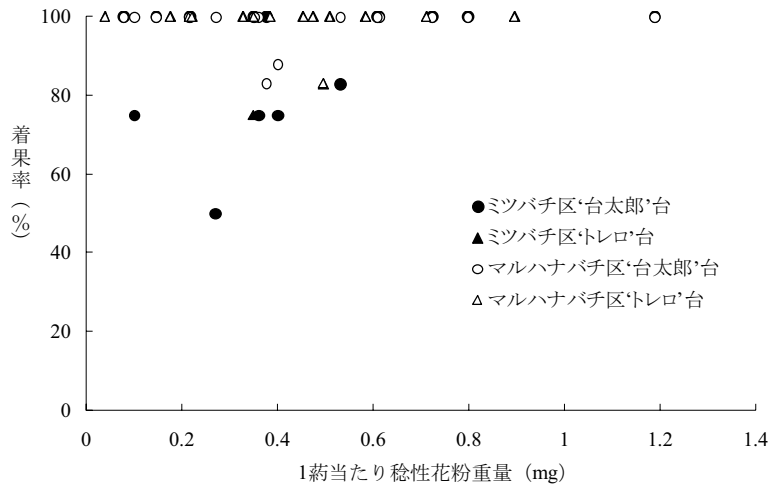


図4 セイヨウミツバチおよびセイヨウオオマルハナバチによって受粉した台木品種の異なる促成栽培ナスの稔性花粉重量が着果率に及ぼす影響

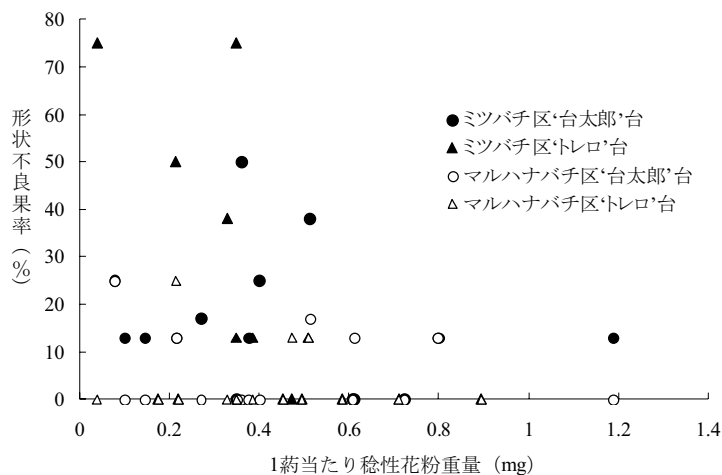


図5 セイヨウミツバチおよびセイヨウオオマルハナバチによって受粉した台木品種の異なる促成栽培ナスの稔性花粉重量が形状不良果率に及ぼす影響

観に影響し、最低気温10℃では慣行の4-CPA溶液処理に比べて収量と果実外観は劣ったが、12～15℃では同等であった。最低気温15℃で栽培した本研究では、セイヨウオオマルハナバチによる受粉で収量および果実外観に実用上の問題はなかった。しかし、セイヨウミツバチの場合、1葯当たり稔性花粉重量が減少する冬期には、稔性花粉重量0.5～0.6 mgを境に着果率低下の傾向が認められ、同時に形状不良果率が高まった（図4, 5）。これらがセイヨウオオマルハナバチによる受粉と同等になったのは4月以降に1葯当たり稔性花粉重量が0.6 mg以上に回復してからであった。従って、セイヨウミツバチによる受粉効果をセイヨウオオマルハナバチと同等にするためには、1葯当たりの稔性花粉重量を0.6 mg以上に維持する必要があると考えられる。

なお、‘台太郎’台と‘トレロ’台では稔性花粉重量と種子数に差がなかったにも係わらず、‘台太郎’台で上物率が高く、形状不良果率が低かった（表9）。この原因として、‘台太郎’は穂木の‘千両’と同じ、*Solanum melongena*の一代交雑種であるのに対し、‘トレロ’および‘トルバム・ビガー’は‘千両’と別種の*S. torvum*であることが考えられる。‘台太郎’を台木に用いると‘トルバム・ビガー’台に比べて形状不良果の発生が少ないことが報告されている（吉田, 2000）。このため、‘トレロ’台では、‘トルバム・ビガー’台と同様に形状不良果が増加したと考えられる。花粉媒介昆虫を利用したナスの栽培を安定化するには台木品種を含めて適性品種の育成や選定が課題であると考えられる。

第4章 キオビオオハリナシバチの利用

第1節 トマトの抑制栽培での利用

トマトの花は葯同士が側面で癒合して柱頭を筒状に取り囲んだ葯筒を形成しており、この葯筒の内側が開葯して受粉する(斉藤, 1974a)。このため、ワーカーが葯筒の内側の開葯部に直接接触することは困難であり、結実率を高めるには、セイヨウオオマルハナバチのように葯に噛みつきそれを抱え込むようにしてぶら下がり、胸部の筋肉を振動させ花粉を懐の体毛で受け止める振動採粉が有効であるが、セイヨウミツバチは振動採粉を行わない(松浦, 1993)。このため、第3章第1節で述べたようにセイヨウミツバチはトマトの交配に利用できない。

ハリナシバチは熱帯・亜熱帯地方に分布するハリナシバチ亜科Meliponinaeの社会性ハナバチ類の総称であるが、このうちオオハリナシバチ属 *Melipona* のハリナシバチ類はセイヨウオオマルハナバチと同様に振動採粉する(Roubik, 1989; Heard, 1999)。平野・穩明寺(2003)は、ブラジル原産のオオハリナシバチ属のキオビオオハリナシバチ *Melipona quadrifasciata* を日本に導入し、トマトを栽培するプラスチックハウスに約20日間放飼し、トマトの結実率がセイヨウオオマルハナバチと比較して遜色ないことを明らかにした。振動採粉をするキオビオオハリナシバチは、原産国のブラジルにおいても、水耕トマトの花粉媒介昆虫として期待されている(Del Sarto et al., 2005)。しかし、熱帯地方原産の本種を低温期のトマト栽培に利用した例はない。そこで、11月から3月まで収穫するトマトの抑制栽培におけるキオビオオハリナシバチの受粉効果について、セイヨウオオマルハナバチと比較実験を実施し、低温期の利用の可能性を検討した。

材料および方法

1. 実験区

農業試験場内の連棟型プラスチックハウス(225 m²: 間口9.0 m, 奥行き25.0 m, 高さ3.5 m)に定植したトマト(品種: 'ハウス桃太郎')を用いて実験した。砂壤土とパーライトを等量配合した用土を入れたプラスチック製コンテナ(幅23.0 cm, 長さ64.0 cm, 深さ18.5 cm, アイリス・オーヤマ(株)社製)を両区に52個ずつ2列平行に並べ、8月30日に本葉7枚展開期のトマト苗を株間32.5 cmで定植し、両区とも104株ずつ供試した。目視による訪花調査を実施するスペースが確

保できるよう列間は2.3 mと広くした。

ハウス内にはワーカーの逃亡を防止するため、2 mm × 4 mm目合いの透明ネット(第3章第1節と同じ)を蚊帳状に張った区(幅4.2 m, 長さ22.0 m, 高さ3.1 m)を2区設け、キオビオオハリナシバチを放飼したハリナシバチ区およびセイヨウオオマルハナバチを放飼したマルハナバチ区をそれぞれ設けた。また、両区とも、26株ずつの第1花房の1番花が開花する直前からその花房の全花が開花終了するまで2 mm × 4 mm目合いの透明ポリエチレン製網袋を被せてワーカーの訪花を防ぎ、これを対照区とした。

2005年9月13日から2006年3月31日までの200日間、ハリナシバチ区にはキオビオオハリナシバチの巣箱、マルハナバチ区にはセイヨウオオマルハナバチの巣箱を1箱ずつ設置した。供試したキオビオオハリナシバチのコロニーは2005年8月7日にブラジル連邦共和国から輸入されたもので、ワーカー数は約250頭であった。図6に示したように、冷房にはマルハナバチ用巣箱冷却装置(葉山電器製作所(株)社製)を、暖房にはゴムマット製ヒーター(昭和精機工業(株)社製)を用いた温度調節機能と給餌室を備えた飼育箱(厚さ11 mmの合板製)を自作して、この中にキオビオオハリナシバチの巣箱を収め、巣内温度を25~30℃に保った。放飼期間中のキオビオオハリナシバチには、巣箱当たり蜂蜜50%水溶液30 ml, 生花粉2 g, プロポリス1 gおよび水10 mlを与え、これらを4~5日間隔で更新した(以下の実験では、キオビオオハリナシバチへは全て同じ方法で給餌した)。セイヨウオオマルハナバチには第1章第1節と同様に給餌した。キオビオオハリナシバチについては、今回のような小面積の放飼実験でもセイヨウオオマルハナバチでみられるような過訪花による花柱や子房の損傷が生じないとされており(平野・穩明寺, 2003)、出巢制限は行わなかった(以下のキオビオオハリナシバチの全ての放飼実験で出巢制限を行わなかった)。実験期間中、ハリナシバチ区ではコロニーの更新は行わなかったが、マルハナバチ区では11月10日および1月17日に衰退したコロニーを新たなコロニーと交換した。

キオビオオハリナシバチの花粉採餌行動は16~20℃以上から頻繁に観察されるため、昼間も加温を行い8時から17時まで最低気温を18℃以上に維持した。夜間の加温は17時から22時までを15℃, 22時から6時までを12℃, 6時から8時までを15℃以上になるよう設定し、昼夜とも27℃以上になると天窓および側窓を開放した。

施肥は園試処方（山崎ら，1976）0.4～0.8単位の液肥を用い，1日3～10回，1回0.2～0.3 L/株施用した．1株当たり施用量はNが39 g，P₂O₅が16 g，K₂Oが67 gであった．

2. 調査方法

(1) 採粉重量および採粉時間

第4章第1節の方法で11月1日および12月9日に初回採粉時の採粉重量および採粉時間を調査した．結実した花での採粉率を推定するため，ワーカーを自由に訪花させた後，花弁が萎凋し始めて脱落直前の花から葯を採取し，同様の方法で花粉を取り出して花粉重量を測定した．採粉率は採粉重量を1葯当たり花粉重量で除した値とした．

(2) 受粉効果の評価

開花日が一致する花房を調査対象として，10月6日から12月7日までに7日間隔で計10回，第2～3花が開花中の花房を無作為に30房選定した．調査対象果房の第1果がピンポン玉大になった時期に果房毎の着果率を調査した．着色した果実から順に3～4日間隔で収量調査を行い，収穫果数と果実重量とともに空洞果，乱形果，窓あき果などの形状不良果数を数えた．そして，収穫果数から形状不良果数を引き算した値を正常果数とし，正常果の重量を正常果収量とした．さらに，同時期に開花した果房ごとに10回，正常果5果を対象に種子数を数えた．

(3) 開花状態の異なる花への訪花率

開花後の経過日数とワーカーの訪花率の関係を知るため，開花後日数の異なる花に対する選好性を調査した．1月27日，30日，31日，2月1日，2日および3日に花卉裂開直後の花を各8個選び，これに第3章第1節と同じ1 mm×1 mm目合いの透明ポリエチレン製網袋（75 mm×75 mm）を被せてワーカーの訪花を防いだ．2月6日10時20分から13時まで網袋を除去し，花卉裂開後の経過日数が異なる花をワーカーに選択させた．調査中のワーカーの出巢個体数は，巣口の開閉操作によって常時1～3匹に制限した．そして，葯にバイトマ

ークがある花を訪花した花とし，開花後日数別にバイトマークがある花数を開花後日数ごとの調査花数で除して訪花率を求めた．なお，葯にバイトマークのある花のうち，花柱に傷痕のある花数を調査し，下式により有傷花柱率を求めた．

$$\text{有傷花柱率} = \frac{\text{花柱に傷痕のある花数}}{\text{バイトマークのある花数}} \times 100$$

また，2月6日10時20分から13時までの選好性調査中に花卉裂開後の日数ごとに，2花を対象にワーカーの訪花行動を観察し，1花当たりの訪花回数を記録した．選好性調査終了後に開花後日数別に葯の裂開状況を調査し，葯の裂開した花の割合を開葯花率とした．

結果

キオビオオハリナシバチは放飼開始13日後の9月26日から，セイヨウオオマルハナバチは3日後の9月16日から訪花を開始した．表13に示したように，初回採粉時の1葯当たり採粉重量および採粉率は，ハリナシバチ区で102 μgおよび76.5%，マルハナバチ区では81 μgおよび58.0%で，ハリナシバチ区はマルハナバチ区に比べて有意に採粉重量が多く，採粉率も高かった（ $p < 0.05$ ）．繰り返し訪花を受けたと判断される花卉脱落直前の花では，いずれも初回訪花時より採粉率は高く，キオビオオハリナシバチは86.9%，セイヨウオオマルハナバチは76.5%となり，両区の間には有意差が認められた（ $p < 0.05$ ）．なお，採粉時間には区間で差が認められなかった（ $p > 0.05$ ）．

着果率はハリナシバチ区が96.3%，マルハナバチ区が92.7%で，ハリナシバチ区はマルハナバチ区に比べて有意に高かった（ $p < 0.05$ ）（表14）．また，両区の種子数はいずれも185粒であった（ $p > 0.05$ ）（表14）．しかし，対照区の着果率および種子数は44.3%および87粒で，花粉媒介昆虫を放飼した両区に比べて有意に着果率が低く種子数も少なかった（ $p < 0.05$ ）（表14）．4段果房から10段果房の果房段数別の果房当たり正常果収量は，ハリナシバチ区で760 g，マルハナバチ区で

表13 抑制裁培トマトにおけるキオビオオハリナシバチおよびセイヨウオオマルハナバチの採粉量，採粉率および採粉時間

ポリネーター	初回採粉時			開花終了時
	1葯当たり採粉重量 (μg)	採粉率 (%)	採粉時間 (秒)	採粉率 (%)
ハリナシバチ	102	76.5	53	86.9
マルハナバチ	81	58.0	68	76.5
有意性 ²	*	*	n.s.	*

²採粉量および採粉時間は分散分析，採粉率は χ^2 検定により，*：5%水準で有意差があり，

n.s.：有意差がない

表14 キオピオオハリナシバチおよびセイヨウオオマルハナバチによる受粉が抑制栽培トマトの着果率および種子数に及ぼす影響

ポリネーター	着果率 (%)	1果当たり種子数 (粒)
ハリナシバチ	96.3 a	185 a
マルハナバチ	92.7 b	185 a
対照	44.3 c	87 b

同一列の異なる英文字間にはTukeyの多重検定により、5%水準で有意差があり、着果率は逆正弦変換後に検定した

表15 キオピオオハリナシバチおよびセイヨウオオマルハナバチによる受粉が抑制栽培トマトの収量、正常果率および正常果重に及ぼす影響

ポリネーター	正常果収量 (g/果房)	正常果率 (%)	正常果重 (g/箇)
ハリナシバチ	760 a	97.0 a	165 a
マルハナバチ	739 a	97.9 a	164 a
対照	241 b	91.3 b	110 b

同一列の異なる英文字間にはTukeyの多重検定により、5%水準で有意差がある正常果率は逆正弦変換後に検定した

表16 花卉裂開後日数の異なる抑制栽培トマトの花に対するキオピオオハリナシバチおよびセイヨウオオマルハナバチの訪花率と有傷花柱率

花卉裂開後日数	花卉色	開葯花率 (%)		訪花率 (%)		有傷花柱率 (%) ²	
		ハリナシバチ	マルハナバチ	ハリナシバチ	マルハナバチ	ハリナシバチ	マルハナバチ
3	淡黄色	0	13	0	13	0	0
4	黄色	38	50	38	50	0	50
5	黄色	75	88	63	88	0	29
6	黄色	100	100	100	100	0	38
7	淡黄色	100	100	63	100	0	50
10	淡黄色	100	100	25	100	0	38

²訪花した花のうち花柱に傷がある花の比率を示す

表17 キオピオオハリナシバチおよびセイヨウオオマルハナバチが抑制栽培トマトの同一の花に訪花した回数

ポリネーター	訪花回数 (回)
ハリナシバチ	2.6
マルハナバチ	3.6
有意性 ²	n.s.

²分散分析により、n.s.: 有意差がない

739 g, 正常果率はそれぞれ97.0%と97.9%, 1果重はいずれも165 gであり、ハリナシバチ区とマルハナバチ区に有意差は認められなかった ($p > 0.05$) (表15). 一方、対照区では果房当たり正常果収量が241g, 正常果率が91.3%, 1果重が110 gで、いずれも両区に比べて有意に低かった ($p < 0.05$) (表15).

花卉の着色程度は花卉裂開4~6日後が最も濃く、花卉裂開3日後および7日後以降は薄かった (表16). ハ

リナシバチ区およびマルハナバチ区の開葯花率は、花卉裂開3日後が0%および13%と低く、4日後に38%および50%, 5日後に75%および88%と増加し、6~10日後に100%であった (表16). 開花後の日数が異なる花への訪花率は、キオピオオハリナシバチでは花卉裂開3日後が0%で、4日後が38%, 5日後が63%と高まり、6日後に100%になり、その後7日後が63%, 8日後が25%と低下した (表16). セイヨウオオマルハナバチ

は花卉裂開3日後が13%と低く、4日後が50%、5日後が88%と高まり、6~10日後はいずれも100%であった(表16)。有傷花柱は花卉裂開後日数に関わらず、ハリナシバチ区では認められなかった(表16)。マルハナバチ区の有傷花柱率は、訪花率が13%と比較的低かった花卉裂開3日後の花を除くと、29~50%であった(表16)。調査期間中、同一の花に訪花した回数は、ハリナシバチ区が2.6回、マルハナバチ区が3.6回で、両区の間には有意差は認められなかった($p > 0.05$) (表17)。

考 察

キオビオオハリナシバチの初回採粉率および落花直前の花での採粉率は、セイヨウオオマルハナバチに比べていずれも有意に高かったことから、抑制栽培トマトにおいてキオビオオハリナシバチは優れた採粉能力を有することが示唆された(表13)。セイヨウオオマルハナバチの採粉率がキオビオオハリナシバチに比べて低くなった理由は、セイヨウオオマルハナバチは花柱に傷痕が付く程度に強く葯筒に噛み付くため、噛み付かれた部分の葯壁が圧迫されたことで花粉の飛散が抑制された可能性が推察される。

キオビオオハリナシバチやセイヨウオオマルハナバチの振動採粉では、葯筒から飛散した花粉が柱頭に付着して受粉する。このため、花粉媒介昆虫の採粉量に比例して受粉量も増加すると考えられる。しかし、受粉量に比例して増加すると考えられる果実の種子数、正常果率および1果重にキオビオオハリナシバチとセイヨウオオマルハナバチの間で有意差が認められなかった($p > 0.05$) (表14, 15)。宮永ら(未発表)はミニトマトにおいて、キオビオオハリナシバチの訪花回数と柱頭上の花粉粒数および果実の種子数を計数し、花粉粒数は訪花回数に正比例する傾向があったが、種子数と訪花回数との間には必ずしも相関が認められないとしている。表14に示したように両者の種子数に違いがなかったことから、セイヨウオオマルハナバチでは1回の訪花でも結実に十分な量の花粉を受粉させていたためと考えられる。このことから、セイヨウオオマルハナバチの着果率が低い原因を受粉量不足とは考えにくい。セイヨウオオマルハナバチは、コロニーサイズに比べて十分量の花粉が得られない小規模なハウスなどに放飼された場合、ワーカーが同じ花を反復訪花し、葯筒へかみつ়くことにより花柱に損傷を与えることが知られている(平野・穩明寺, 2003)。これを避けるため、給餌と出巢制限をおこなったが、マルハナ

バチ区ではバイトマークの色が濃い花では花柱に噛み傷があり、まれに花柱が噛み切られていた。一方、ハリナシバチ区では花柱の傷痕は全く見られなかった(表16)。これは、キオビオオハリナシバチのワーカーの体長が8~9 mmで、セイヨウオオマルハナバチの10~13 mmより小さく、振動採粉に伴う噛み傷が軽微なことに加え、キオビオオハリナシバチは、セイヨウオオマルハナバチのように著しい反復訪花を行わなかったためと推察される。これが、マルハナバチ区での着果率低下の原因になった可能性が考えられる。なお、マルハナバチ区では着果率が有意に低下した(表14)にも関わらず、両区の正常果収量に有意な差が現れなかった(表15)。ただし、マルハナバチ区の正常果収量はハリナシバチ区の97%で、着果率と同程度の比率であった。

開花後日数の異なる花への訪花率を比較すると、キオビオオハリナシバチは花卉裂開後6日前後の花を集中的に訪花し、7日後および10日後の花への訪花率は低下した。しかし、セイヨウオオマルハナバチでは花卉裂開6日後以降は全ての花を訪花した(表16)。トマトの花粉および雌ずいの受精能力は開葯日から開葯翌日に最も高まる(齊藤, 1974b)。キオビオオハリナシバチが集中的に訪花した花卉裂開6日後前後は開葯日から開葯翌日に当たる花が最も多かった(表16)ことから、キオビオオハリナシバチはセイヨウオオマルハナバチに比べて受精能力の高い時期の花に対する選好性が強いと考えられる。

以上のことから、キオビオオハリナシバチはセイヨウオオマルハナバチに比べて採粉能力が優れること、過訪花による花柱の損傷が起きにくいこと、受精能力の高い時期の花に対する選好性が強いことが明らかになった。

第2節 トマトの雨除け栽培での利用

トマトの原産地のブラジルにおいて、施設栽培トマトの花粉媒介昆虫にキオビオオハリナシバチを導入した実験では、ブラジルで慣行の手動授粉と同等の大きさの果実が収穫できた(Del Sarto et al., 2005)。しかし、この実験での収穫物調査は生育初期の果房だけを対象に行っており、栽培期間を通じた検討は行われていない。この研究は熱帯地方の平均気温が30℃を越える高温下の雨除け栽培で実施され、我が国の主な夏秋トマト産地の平均気温(28℃未満)と比較して高い温度条件下での実験である。また、高温期のトマトの花粉生成は品種によって異なる(池田・忠内, 1995)が、我

が国の品種で検討された例はない。このため、我が国の温度条件や品種を用いての検討が必要である。

トマトの抑制栽培の低温期にキオビオオハリナシバチを放飼した飛川・宮永（2007）の報告では、セイヨウオオマルハナバチに比較して着果率が優れ、1果当たりの種子数、正常果収量および果実外観は同等であり、キオビオオハリナシバチは花粉媒介昆虫として利用価値が高いことが示された。そこで、本節では夏秋期の主要作型である雨除け栽培の全期間を通じてキオビオオハリナシバチの受粉効果をセイヨウオオマルハナバチと比較し、キオビオオハリナシバチの実用性を検討した。

材料および方法

1. 実験区

農業試験場内の本章第1節と同形状の連棟型雨除けプラスチックハウス（225 m²：間口9.0 m，奥行25.0 m，高さ3.5m）内に定植したトマト（品種：‘桃太郎8’）を用いて実験した。本章第1節と同様にハウス内に2区を設け、それぞれハリナシバチ区およびマルハナバチ区とした。また、両区とも、本章第1節と同じ方法で26株ずつに各花房の1番花開花直前からその花房の全花が開花終了するまで網袋を被せてワーカーの訪花を防ぎ、これを対照区とした。

2006年6月3日から10月6日までの125日間、ハリナシバチ区にはキオビオオハリナシバチの巣箱、マルハナバチ区にはセイヨウオオマルハナバチの巣箱を1箱ずつ区の中央に設置した。キオビオオハリナシバチの巣箱は高さ40 cmの台の上に、セイヨウオオマルハナバチの巣箱は第3章第1節と同様に設けた縦穴内に設置した。供試したキオビオオハリナシバチのコロニーは2006年5月にブラジル連邦共和国から輸入したもので、ワーカー数は約300頭であった。本章第1節と同じ飼育箱の中にこのコロニーの巣箱を収め、巢内温度を25～30℃に保った。キオビオオハリナシバチへは本章第1節、セイヨウオオマルハナバチ（ワーカー数約100頭）へは第1章第1節と同じ方法で給餌した。実験期間中、セイヨウオオマルハナバチのコロニーが衰退し始めたので、8月3日にコロニーを更新した。一方、キオビオオハリナシバチのコロニーは衰退が見られなかったため更新しなかった。

5月16日に本葉5枚展開期の苗を本章第1節と同じ方法・規模で定植した。施肥には園試処方（山崎ら、1976）0.4～0.7単位の液肥を用い、1日3～10回、1回0.2～0.3 L/株を施用した。1株当たり施用量はNが52 g、

P₂O₅が21 g、K₂Oが90 gであった。

2. 調査方法

(1) 訪花ワーカー数、訪花率および採粉率

訪花ワーカー数については、6月12日から9月25日まで5日間隔で計21回、8時30分に訪花中のキオビオオハリナシバチのワーカー数を計測した。花弁展開期の花を20花ずつ無作為に抽出し、7日間隔で計16回、訪花率を調査した。バイトマークが認められた花を訪花とし、訪花数を調査花数で除した割合を訪花率とした。訪花率の調査に用いた花の花弁が萎凋し始めた時期に、本章第1節と同じ方法で採粉率を求めた。

(2) 稔性花粉重量

6月26日から9月25日まで7日間隔で計14回調査し、第2章第1節の方法で稔性花粉重量を測定した。

(3) 受粉効果の評価

6月12日から9月25日まで7日間隔で計16回、開花日が一致する花房を調査対象として、着果率、正常果数、形状不良果数、果実重量および種子数を本章第1節と同じ方法で調査した。

結果

1. 稔性花粉重量、訪花率および採粉率

時期別の開花6日前から10日前までの平均気温および稔性花粉重量の推移を図7に示した。気温上昇に伴い稔性花粉重量が45 μgから5 μgに減少した6月26日から7月31日の時期を花粉減少期（以下、減少期とする）、その後の稔性花粉重量が1 μg以下と極わずかであった8月7日から9月4日までの時期を花粉欠乏期（以下、欠乏期とする）、気温低下に伴い稔性花粉重量が19 μgから39 μgに増加した9月11日から25日の時期を花粉増加期（以下、増加期とする）と名付けて区分した（図7）。第2章第2節で述べたように、稔性花粉重量は開花6～10日前の平均気温と高い相関関係がある。これらの期間における開花6～10日前のハウス内平均気温は、減少期が25.1～27.8℃、欠乏期が28.6～29.7℃、増加期が24.1～25.4℃であった（図7）。

ハリナシバチ区の訪花ワーカー数は、減少期が2.1頭、欠乏期が1.0頭、増加期が2.0頭で、欠乏期は減少期および増加期に比較して有意に少なかった（ $p < 0.05$ ）（表18）。ハリナシバチ区とマルハナバチ区の訪花率を花粉量の異なる時期別に比較すると、減少期ではハリナシバチ区が94.4%、マルハナバチ区が99.4%で両者の間で有意差はなかった（ $p > 0.05$ ）。欠乏期ではハリナシバチ区が60.0%、マルハナバチ区が100%となり、ハリナシバチ区の訪花率はマルハナバチ区に比較して

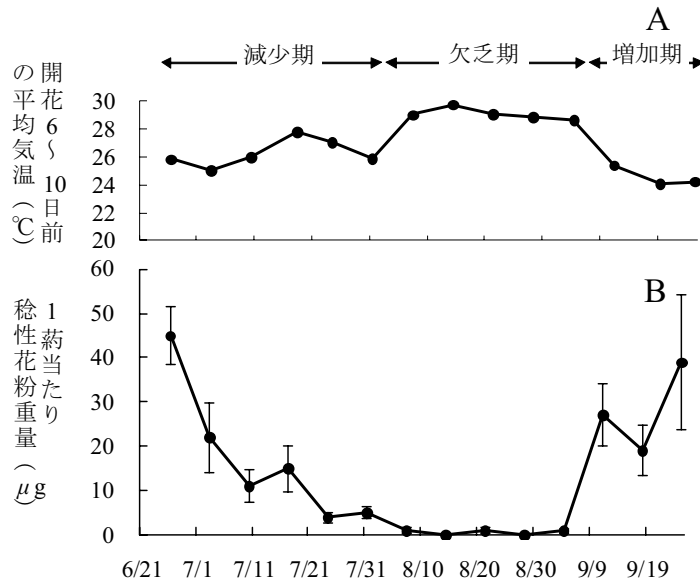


図7 雨除け栽培トマトにおける開花6～10日前のハウスの平均気温 (A) および稔性花粉重量 (B) の推移
略称は本文参照，垂線は標準誤差を示す

表18 雨除け栽培トマトの稔性花粉重量の違いがキオビオオハリナシバチの訪花ワーカー数に及ぼす影響

時期	1葯当たり稔性花粉重量 (μg)	訪花ワーカー数 (頭)
減少期	17.1a	2.1 a
欠乏期	0.8 b	1.0 b
増加期	28.4 a	2.0 a

同一列の異なる英文字間にはTukey-Kramerの多重検定により，5%水準で有意差がある

表19 雨除け栽培トマトの稔性花粉重量の違いがキオビオオハリナシバチおよびセイヨウオオマルハナバチの訪花率および採粉率に及ぼす影響

ポリネーター	訪花率 (%)			採粉率 (%)		
	減少期	欠乏期	増加期	減少期	欠乏期	増加期
ハリナシバチ	94.4 a	60.0 b	100 a	78.9 a	58.7 b	73.3 a
マルハナバチ	99.4 a	100 a	100 a	76.4 a	61.6 b	75.1 a

同一行および同一列は逆正弦変換後Tukey-Kramerの多重検定により，異なる英文字間には5%水準で有意差がある
略称は本文参照

有意に低く ($p < 0.05$)，増加期では両種とも100%で差は認められなかった ($p > 0.05$) (表19)。

ハリナシバチ区とマルハナバチ区の採粉率を花粉量の異なる時期別に比較すると，減少期にはハリナシバチ区が78.9%，マルハナバチ区が76.4%，欠乏期にはハリナシバチ区が58.7%，マルハナバチ区が61.6%，増加期ではハリナシバチ区が73.3%，マルハナバチ区が75.1%で，いずれの時期も両種間に有意差は認めら

れなかった ($p > 0.05$) (表19)。

2. 受粉効果

ハリナシバチ区とマルハナバチ区の着果率を花粉量の異なる時期別に比較すると，減少期ではハリナシバチ区が61.4%，マルハナバチ区が62.8%，対照区が0.1%となり，ハリナシバチ区とマルハナバチ区の着果率には有意差がなかった ($p > 0.05$) が，対照区に比較して有意に高かった ($p < 0.05$) (表20)。欠乏期では，

表20 稔性花粉重量の違いがキオビオオハリナシバチおよびセイヨウオオマルハナバチによって受粉した雨除け栽培トマトの着果率、種子数、正常果重および正常果収量に及ぼす影響

ポリネーター	着果率 (%)			1果当たり種子数 (粒)			正常果重 (g/箇)			正常果収量 (g/果房)		
	減少期	欠乏期	増加期	減少期	欠乏期	増加期	減少期	欠乏期	増加期	減少期	欠乏期	増加期
ハリナシバチ	61.4 b	15.0 d	79.9 a	142 a	54 b	124 a	123 b	106 b	186 a	434 b	98 d	642 a
マルハナバチ	62.8 b	27.8 c	71.5 a	146 a	58 b	114 a	119 b	120 b	182 a	441 ab	199 c	670 a
対照	0.1 e	0.1 e	9.5 d	51 b	2 c	25 b	46 d	12 d	97 c	36 e	3 e	115 d

同一行および同一列の異なる英文字間にはTukey-Kramerの多重検定により、5%水準で有意差あり、着果率は逆正弦変換後に検定した略称は本文参照

ハリナシバチ区が15.0%、マルハナバチ区が27.8%、対照区が0.1%で、ハリナシバチ区は対照区に比較して有意に高かった ($p < 0.05$) が、マルハナバチ区に比較して有意に低かった ($p < 0.05$) (表20)。増加期ではハリナシバチ区が79.9%、マルハナバチ区が71.5%、対照区が9.5%で、ハリナシバチ区とマルハナバチ区の着果率には有意差がなかった ($p > 0.05$) が、対照区に比較して有意に高かった ($p < 0.05$) (表20)。ハリナシバチ区とマルハナバチ区の着果率および果房当たりの正常果収量は、ともに欠乏期に開花した果房で低下した (表20)。

ハリナシバチ区、マルハナバチ区および対照区の正常果1果当たりの種子数を比較すると、減少期に開花した果実の種子数はハリナシバチ区が142粒、マルハナバチ区が146粒、対照区が51粒、欠乏期ではハリナシバチ区が54粒、マルハナバチ区が58粒、対照区が2粒、増加期ではハリナシバチ区が124粒、マルハナバチ区が114粒、対照区が25粒で、各区ともに欠乏期に開花した果実の種子数は有意に減少した ($p < 0.05$) (表20)。いずれの時期の種子数もハリナシバチ区およびマルハナバチ区が対照区に比較して有意に多く ($p < 0.05$)、ハリナシバチ区とマルハナバチ区には有意差は認められなかった ($p > 0.05$) (表20)。

同様に、正常果1果重の比較では、減少期に開花した果実ではハリナシバチ区が123 g、マルハナバチ区が119 g、対照区が46 g、欠乏期ではハリナシバチ区が106 g、マルハナバチ区が120 g、対照区が12 gであり、増加期ではハリナシバチ区が186 g、マルハナバチ区が182 g、対照区が97 gで、各区ともに増加期に増加した。しかし、いずれの時期もハリナシバチ区およびマルハナバチ区は対照区に比較して有意に重く ($p < 0.05$)、ハリナシバチ区とマルハナバチ区には有意差は認められなかった ($p > 0.05$) (表20)。

また、ハリナシバチ区とマルハナバチ区の正常果収量を花粉量の異なる時期別に比較すると、開花時期が

減少期に当たった果房当たりの正常果収量は、ハリナシバチ区が434 g、マルハナバチ区が441 g、対照区が36 gで、ハリナシバチ区とマルハナバチ区の正常果収量には有意差がなかった ($p > 0.05$) が、対照区に比較して有意に高かった ($p < 0.05$) (表20)。欠乏期に開花した果房当たりの正常果収量は、ハリナシバチ区が98 g、マルハナバチ区が199 g、対照区が3 gで、ハリナシバチ区は対照区に比較して有意に高かった ($p < 0.05$) が、マルハナバチ区に比較して有意に低かった ($p < 0.05$) (表20)。増加期ではハリナシバチ区が642 g、マルハナバチ区が670 g、対照区が115 gで、ハリナシバチ区とマルハナバチ区の正常果収量には有意差がなかった ($p > 0.05$) が、対照区に比較して有意に高かった ($p < 0.05$) (表20)。

考察

トマトの稔性花粉量は夏期の高温で減少し (池田・忠内, 1995)、開花6~10日前の5日間の平均気温とトマトの稔性花粉重量との間には高い負の相関関係がある (飛川・石倉, 2008)。本実験でも図7に示したように、開花6~10日前の5日間の平均気温が28℃を上回った8月上旬から9月上旬にかけて、1葯当たり稔性花粉重量は1 μg未満と極少量になった。この期間にはキオビオオハリナシバチのワーカーの採餌活性が低下し、セイヨウオオマルハナバチに比べて訪花率が低下した (表19)。このため、欠乏期に開花したハリナシバチ区の果房の着果率および正常果収量は、マルハナバチ区に比較して低下したと考えられる (表20)。Del Sarto et al. (2005) は、日平均気温が30℃を越える高温条件下での雨除け栽培トマトの施設に、キオビオオハリナシバチを放飼した場合の訪花率は、95%と高いことを報告した。しかし、本実験では、開花6~10日前の平均気温が28℃を越えて稔性花粉が欠乏すると、キオビオオハリナシバチの訪花率は60%に低下した (表19)。この違いの理由として、Del Sarto et al. (2005)が用いた

品種の種子量が十分あったことから稔性花粉量が維持されていたと考えられること、本実験で放飼した株当たりのワーカー数がDel Sarto et al. (2005)の実験に比べて約20%と少なかったこと、本実験では花粉を給餌したため、給餌しなかったDel Sarto et al. (2005)の実験に用いたコロニーの方が花粉要求度が高かったことが考えられる。しかし、訪花率が100%であったマルハナバチ区でさえ欠乏期の着果率および正常果収量は、減少期および増加期に比べて大きく低下し（表20）、利用は困難と考えられた。このことから、稔性花粉が欠乏する時期に訪花率を高めたとしても、セイヨウオオマルハナバチと同様に、キオビオオハリナシバチも利用は困難であると考えられる。

上述のように、トマトの稔性花粉が欠乏する時期のキオビオオハリナシバチの利用は困難であるが、夏期であっても稔性花粉が十分確保できれば、キオビオオハリナシバチは雨除け栽培トマトの有望な花粉媒介昆虫になり得ると考えられる。日平均気温が28℃以下では、トマトの稔性花粉重量は1.6 μg 以上になった（第3章第1節）。また、トマトの抑制栽培でキオビオオハリナシバチをハウス内の日平均気温が14.2~23.3℃の時期に放飼すると、キオビオオハリナシバチの採粉効率および着果率はセイヨウオオマルハナバチに比較して優れ、1果当たりの種子数、正常果収量および果実外観は同等であった（本章第1節）。さらに、本節で平均気温が25.1~27.8℃の減少期および24.1~25.4℃の増加期には、キオビオオハリナシバチを用いた受粉によって60~80%の高い着果率が得られた（表20）。本実験を実施した農業試験場（赤磐市）は低標高地で、県内では雨除け栽培トマトの適地ではない。雨除け栽培は夏秋期に収穫される作型で、気温が高いと裂果の発生が増加する（Frazier and Bowers, 1947）ことなどから、西日本の産地は準高冷地など夏期比較的冷涼な地域に限られる。前述のようにキオビオオハリナシバチは平均気温が28℃未満の雨除け栽培には利用可能であり、夏秋期のトマト産地のほとんどはこの条件に当てはまる。本章第1節と本節の結果から、キオビオオハリナシバチは多くの有益な性質を持ち、我が国のトマトの花粉媒介昆虫として有望と考えられる。

なお、北海道の雨除け栽培の大型ハウスではネットの展帳が困難なため、セイヨウオオマルハナバチの使用許可が得られない。また、在来種のクロマルハナバチは元々生息していないため、業者は北海道での販売を自粛している。このため、事実上、北海道の大型ハウスで使える花粉媒介昆虫はない。第1章で述べたよ

うにキオビオオハリナシバチが北海道で定着することは考え難く、生態リスクは低いと考えられ、本種の実用化が強く求められる。

第3節 ナスの促成栽培での利用

セイヨウミツバチはセイヨウオオマルハナバチのような振動採粉を行わないためナスの受粉効率が悪く、低温期に稔性花粉量が減少すると、着果率が低下し形状不良果率が高まる（飛川, 2004）。このため、冬期も継続して収穫を続ける促成栽培では、全期間を通じてのセイヨウミツバチの利用は困難である。キオビオオハリナシバチはセイヨウオオマルハナバチと同様に振動採粉する。しかし、ナスでのキオビオオハリナシバチの利用に関する報告はない。そこで、本節では、ナスの促成栽培における本種の受粉効果について、セイヨウオオマルハナバチとの比較を行い、ナスでの利用の可能性を検討した。

材料および方法

1. 実験区

農業試験場内の第3章第1節と同形状のプラスチックハウス内に定植したナス（品種：‘千両’、台木品種：‘台太郎’または‘トレロ’）を用いて実験した。第3章第1節と同じ方法でハウス内を等分して2区画分け、それぞれハリナシバチ区およびマルハナバチ区とした。

2005年12月29日から2006年6月1日までの155日間、ハリナシバチ区にはキオビオオハリナシバチの巣箱、マルハナバチ区にはセイヨウオオマルハナバチの巣箱を区中央の高さ40 cmの台の上に1箱ずつ設置した。供試したキオビオオハリナシバチのコロニーは2005年12月にブラジル連邦共和国から輸入したもので、ワーカー数は約200頭であった。本章第1節と同じ飼育箱の中にキオビオオハリナシバチの巣箱を収め、巣内温度を25~30℃に保った。キオビオオハリナシバチへは本章第1節、セイヨウオオマルハナバチへは第1章第1節と同じ方法で給餌した。実験期間中、セイヨウオオマルハナバチのコロニーが衰退し始めたので、2006年2月24日および4月22日にコロニーを更新した。一方、キオビオオハリナシバチのコロニーは衰退が見られなかったため更新しなかった。

2005年9月9日に第1花房開花期の苗を株間75 cm、1条植えで2列に定植し、目視による訪花調査を実施するスペースが確保できるよう列間は3.6 mと広くとった。台木品種間での収量、形状不良果の割合などを比

較するため、両区内にはそれぞれ‘台太郎’台および‘トレロ’台のナスを6株ずつ栽培し、1区24株で実験を行った。

本章第1節で述べたようにキオピオオハリナシバチが活発に花粉採餌できるように、昼間も加温を行い8時から17時までで最低気温を21℃以上に維持した。夜間の加温は17時から22時までを15℃、22時から6時までを13℃、6時から8時までを15℃以上になるよう設定し、昼夜とも28℃以上になると換気扇によって換気した。施肥には大塚化学製養液土耕2号および5号を用い、液肥で1日1～2回施用した。1株当たり施用量はNが61 g、P₂O₅が82 g、K₂Oが132 gであった。

2. 調査方法

(1) 果実調査

第2章第2節と同じ方法で2006年2月3日から6月9日まで果実を調査した。

(2) 稔性花粉重量調査

第2章第1節と同じ方法で稔性花粉重量を調査した。1月11日から5月23日まで約15日間隔で月2回9時に薬を採取した。また、薬の採取日に開花した花を対象に1区当たり12花に紙ラベルを着けて収穫時に収穫果数と形状不良果数を数え、着果率と形状不良果率を算出した。

(3) 初回訪花時間と採粉重量調査

第2章第1節と同様の方法で1月24日、2月7日、4月19日および5月11日に開花した花を対象に初回訪花時の訪花時間および採粉重量を調査した。初回訪花時間の調査には24花ずつ、採粉重量の調査には未訪花薬、初回訪花後の薬および開花2日後の薬24薬ずつを用いた。

結果

キオピオオハリナシバチは放飼開始1週後の1月5日から、セイヨウオオマルハナバチは放飼当日の12月29日から訪花を開始した。その後、実験期間中の開花2日後までの平均採粉率は、ハリナシバチ区で97.1%、マルハナバチ区では98.7%で、ほぼ全花にバイトマークが認められた。

未採粉花への初回訪花時の採粉時間と1薬当たり採粉重量は、それぞれハリナシバチ区で85秒と0.58 mg、マルハナバチ区では73秒と0.52 mgで、いずれもハリナシバチ区とマルハナバチ区との間に有意差は認められなかった ($p > 0.05$) (表21)。

正常果収量はハリナシバチ区が12.8 kg/株、マルハナバチ区が12.9 kg/株、上物率は同様に61.2%、60.4%、形状不良果率も同様に10.4%、9.4%で、両者に有意差は認められなかった ($p > 0.05$) (表22)。台木品種間で

表21 促成栽培ナスにおけるキオピオオハリナシバチおよびセイヨウオオマルハナバチの採粉重量、採粉率および初回訪花時間

ポリネーター	1薬当たり採粉重量 (mg)		採粉率 (%)		初回訪花時間 (秒)
	初回訪花後	開花2日後	初回訪花後	開花2日後	
ハリナシバチ	0.58	0.83	62.9	97.1	85
マルハナバチ	0.52	0.86	58.7	98.7	73
有意性 ²	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

²採粉重量および初回訪花時間は分散分析、採粉率は χ^2 検定により、n.s.: 有意差がない

表22 キオピオオハリナシバチおよびセイヨウオオマルハナバチによる受粉が促成栽培ナスの収量、上物率および形状不良果率に及ぼす影響

ポリネーター	台木	正常果収量 (kg/株)	上物率 (%)	形状不良果率 (%)
ハリナシバチ	‘台太郎’	12.7	64.4	9.8
	‘トレロ’	13.0	58.0	11.0
	平均	12.8	61.2	10.4
マルハナバチ	‘台太郎’	12.8	63.1	8.4
	‘トレロ’	12.9	57.7	10.3
	平均	12.9	60.4	9.4
有意性 ²	ポリネーター間	n.s.	n.s.	n.s.
	台木間	n.s.	**	*
	交互作用	n.s.	—	—

²収量は分散分析、上物率および形状不良果率は χ^2 検定により、*, **: 5, 1%の水準で有意差があり、n.s.: 有意差がない。

は、正常果収量は‘台太郎’台と‘トレロ’台との間に有意差は認められなかった ($p > 0.05$) が、‘台太郎’台は上物率が高く ($p < 0.01$)、形状不良果率は低かった ($p < 0.05$) (表22)。

開花時の1葯当たり稔性花粉重量は0.36~0.92 mg、形状不良果率は概ね0~17%の間で変動したが、稔性花粉重量が少ない場合に形状不良果率が高まる傾向は、ハリナシバチ区、マルハナバチ区ともに認められなかった (図8)。着果率はハリナシバチ区で97.9%、マルハナバチ区では97.6%で調査期間を通じて高く、両者に差は認められなかった (データ省略)。

考察

キオビオオハリナシバチの未採粉花への初回訪花時の訪花時間および採粉重量は、セイヨウオオマルハナバチと同等であった (表21) ことから、キオビオオハリナシバチの採粉効率はセイヨウオオマルハナバチと同等と考えられる。振動採粉しないセイヨウミツバチでは、1葯当たり稔性花粉重量が0.5 mg以下に減少するとセイヨウオオマルハナバチに比べて着果率が低下し、形状不良果率が高まったが (第2章第1節)、キオビオオハリナシバチではこのような現象は見られず、

形状不良果率はセイヨウオオマルハナバチと同様で、稔性花粉重量が低下しても形状不良果の発生は少なかった (図8)。

本実験はキオビオオハリナシバチの訪花を活発に行わせるために、昼間の最低気温を慣行の15℃より高い21℃に設定して行った。このことで、キオビオオハリナシバチの訪花活性が高まり、着果率の低下や形状不良果の増加が抑制された可能性も考えられる。しかし、セイヨウオオマルハナバチと同程度の訪花率が確保できれば、キオビオオハリナシバチによる受粉の効果は、セイヨウオオマルハナバチと同等であり、キオビオオハリナシバチはセイヨウオオマルハナバチの代替花粉媒介昆虫となり得ると考えられる。

第2章第1節ではセイヨウオオマルハナバチおよびセイヨウミツバチによる受粉では、台木品種が異なると上物率および形状不良果率が異なり、‘台太郎’台は‘トレロ’台に比べて上物率が高く、形状不良果率が低かった。本実験でも同様に‘トレロ’台では‘台太郎’台に比較して形状不良果率が高まる傾向がみられた。また、台木品種に関わらずハリナシバチ区での正常果収量、上物率および形状不良果率は、マルハナバチ区と同等であった (表22)。

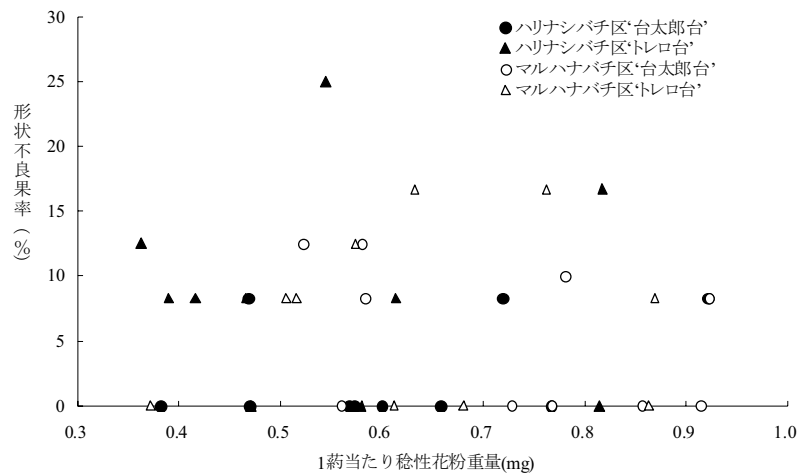


図8 キオビオオハリナシバチおよびセイヨウオオマルハナバチによって受粉した台木品種の異なる促成栽培ナスの稔性花粉重量が形状不良果率に及ぼす影響

第5章 低温期のナス栽培における花粉媒介昆虫の利用技術

第1節 最低夜温が稔性花粉量に及ぼす影響

ナスの促成栽培で受粉にセイヨウオオマルハナバチを利用すると、夜間の最低気温(以下最低夜温とする)が収量と果実外観に影響し、最低夜温10℃では慣行の4-CPA溶液処理と比べて収量、果実外観は劣り、12~15℃では同等となる(三原ら, 1995; 前田ら, 1997; 串間ら, 1999)。また、最低夜温15℃で栽培した第3章第2節の実験では、セイヨウオオマルハナバチによる受粉で収量および果実外観に実用上の問題はなかった。しかし、セイヨウオオマルハナバチに比べて受粉効率の劣るセイヨウミツバチでは、冬期に1葯当たりの稔性花粉重量が0.5 mg以下に減少すると、着果率が低下し形状不良果率が高まった。さらに、宮本ら(2007)はセイヨウミツバチを利用したナスの無加温半促成栽培で、水封マルチを用いて施設内の夜間の平均気温を1~3℃高めると、花粉量が増加し上物率が向上することを報告している。このように、4-CPA溶液処理では、収量・果実外観に問題が生じない低温でも、花粉媒介昆虫による受粉では、稔性花粉量の減少により、収量・果実外観が低下する。そこで、冬期の最低夜温と稔性花粉重量の関係を検討し、改善技術構築の可能性を考察する。

材料および方法

1. 実験区

農業試験場内の第4章第1節と同形状のプラスチックハウス内に小型プラスチックハウス(9 m²:幅3 m, 長さ3 m, 高さ2 m)5棟を設置し、小型ハウス内に定植したナス(品種: '千両', 台木品種: '台太郎' または 'トレロ')を用いて実験した。小型ハウスの換気設定温度を28℃とし、電熱ヒーターによる夜間(以

下, 17時から8時までとする)の加温設定温度を10, 12, 15および18℃とした区(以下, 順に28-10℃, 28-12℃, 28-15℃および28-18℃区とする)および換気設定温度32℃で加温設定温度12℃とした32-12℃区をそれぞれ1棟ずつ設けた。

2002年9月11日に第1花房開花期の苗を株間75 cm, 1条植えで1列に定植し、各区にはそれぞれ'台太郎'台および'トレロ'台のナスを2株ずつ, 計4株供試した。施肥には大塚化学製養液土耕2号および5号を用い、液肥で1日1~2回施用した。1株当たり施用量はNが52 g, P₂O₅が52 g, K₂Oが91 gであった。

2. 調査方法

11月3日から2003年2月24日まで約15日間隔で月2回, 9時に葯を採取した。各区とも開花当日に'台太郎'台, 'トレロ'台それぞれ3花から1花当たり2葯ずつ計6葯を採取して, 第3章第1節の方法で稔性花粉重量を求めた。

結果および考察

最低夜温ごとに12月から2月までの1葯当たり稔性花粉重量を台木品種別に比較すると, '台太郎'台では28-18℃区が0.56 mg, 28-15℃区が0.39 mg, 28-12℃区が0.14 mg, 28-10℃区が0.04 mg, 'トレロ'台では28-18℃区が0.73 mg, 28-15℃区が0.37 mg, 28-12℃区が0.12 mg, 28-10℃区が0.04 mgで, 両台木品種ともに最低夜温が高いほど稔性花粉重量が重い傾向を示した(表23)。セイヨウミツバチによる受粉がセイヨウオオマルハナバチと同等の受粉効果を示す1葯当たり稔性花粉重量は, 0.6 mg以上であった(第3章第2節)。本節の結果から, 0.6 mg以上の稔性花粉重量を得るためには, 最低夜温を18℃以上にする必要があると考えられる。一般にナスの促成栽培は最低夜温を10~13℃で管理しており, 最低夜温18℃では燃料費が膨大になり経済的に実用性がない。一方, 最低夜温が同じ12℃でも昼間の換気温度を高めた32-12℃区の稔性花粉重量は,

表23 最高最低気温が12~2月の促成栽培ナスの稔性花粉重量に及ぼす影響

台木	最高最低気温別の1葯当たり稔性花粉重量 (mg)				
	28-18℃ ^z (20.2℃) ^y	28-15℃ (17.2℃)	28-12℃ (15.1℃)	28-10℃ (14.6℃)	32-12℃ (15.7℃)
'台太郎'	0.56 a	0.39 ab	0.14 bc	0.04 c	0.40 ab
'トレロ'	0.73 a	0.37 b	0.12 bc	0.04 c	0.22 bc

同一行および同一列の異なる英文字間にはTukeyの多重検定により, 5%水準で有意差がある

^z 換気設定温度-加温設定温度を示す

^y () 内の数字は12~2月の小型ハウス内の平均気温を示す

‘台太郎’ 台が0.40 mg, ‘トレロ’ 台が0.22 mgで、28-12°C区に比べて、有意ではない ($p > 0.05$) が増加する傾向を示した (表23)。このことから、稔性花粉重量に対する昼温の影響が示唆された。

第2節 最低昼温が稔性花粉量に及ぼす影響

最低夜温が稔性花粉重量に影響し、最低夜温10°Cから18°Cの範囲では最低夜温が高いほど稔性花粉重量が重い (飛川, 2004)。一方、昼間の最低気温 (以下、最低昼温とする) と稔性花粉量に関する報告はない。

そこで、冬期の最低昼温と稔性花粉重量の関係を検討した。

材料および方法

1. 実験区

農業試験場内の本章第1節の実験で用いたプラスチックハウス内の小型プラスチックハウス内に定植したナス (品種: ‘千両’, 台木品種: ‘台太郎’) を用いて実験した。電熱ヒーターによる小型ハウスの昼間 (以下、8時から17時までとする) の加温設定温度を15, 18, 21, 25°Cとした区 (以下、順に15°C, 18°C, 21°C, 25°C区とする) を1棟ずつつけた。夜間の加温設定温度は、岡山県内産地の慣行に準じて各区とも17時から22時までを15°C, 22時から6時までを13°C, 6時から8時までを15°Cとし、28°C以上で換気扇が作動するように設定した。

2003年9月10日に第1花房開花期の苗を株間75 cm, 1条植えで1列に定植し、1区当たり4株ずつ供試した。この実験では花粉媒介昆虫を放飼せず2~3日間隔で開花中の花を1花当たり5回指で弾いて人為的に授粉した。

施肥には大塚化学製養液土耕2号および5号を用い、液肥で1日1~2回施用した。1株当たり施用量はNが86

g, P₂O₅が77 g, K₂Oが98 gであった。

2. 調査方法

(1) 稔性花粉重量

12月8日, 27日, 2004年1月5日, 19日, 2月2日, 16日の計6回、稔性花粉重量を調査した。開花当日の9時に1区当たり5花から2葯ずつ採取して第3章第1節の方法で稔性花粉重量を測定した

(2) 果実調査

第3章第2節と同じ方法で12月1日から2月28日まで果実を調査した。

結果および考察

12月から2月までの1葯当たり花粉重量は0.91~0.94 mgで、処理区間に有意差はなかった ($p > 0.05$) (表24)。しかし、25°C区の花粉発芽率が60.0%と他の区の花粉発芽率に比べて有意に高かった ($p < 0.05$) ため、1葯当たり稔性花粉重量は25°C区で0.54 mgと最も重くなった ($p < 0.05$) (表24)。他の区の1葯当たり稔性花粉重量は、0.40~0.43 mgで有意差はなかった ($p > 0.05$) (表24)。12月から2月までの最低昼温は、その日の天候によって加温設定温度よりも高い日があった。このため、12月から2月の日最低昼温の平均値は15°C区が20.3°C, 18°C区が21.3°C, 21°C区が22.3°C, 25°C区が25.2°Cであった (表24)。着果率は96~100%で各区間に有意差はなかった ($p > 0.05$) (表25)。1株当たり正常果収量は、25°C区と21°C区がそれぞれ4.1 kgと3.9 kgであり、18°C区および15°C区より有意に多くなった ($p < 0.05$) (表25)。次いで、18°C区の3.5 kgであり、15°C区では3.1 kgと他区に比べて有意に少なかった ($p < 0.05$) (表25)。形状不良果率も処理区間に有意差があり ($p < 0.05$)、25°C区で8.2%と最も低く、次いで18°C区, 21°C区がそれぞれ16.7%, 17.7%と中程度で、15°C区が30.2%と最も高かった (表25)。

表24 12~2月の最低昼温が促成栽培ナスの稔性花粉重量および花粉発芽率に及ぼす影響

区名	日平均 最低昼温 (°C) ^z	1葯当たり 花粉重量 (mg)	花粉発芽率 (%) ^y	1葯当たり 稔性花粉重量 (mg) ^y
15°C	20.3	0.93	42.7 b	0.40 b
18°C	21.3	0.91	47.9 b	0.43 b
21°C	22.3	0.94	43.4 b	0.41 b
25°C	25.2	0.91	60.0 a	0.54 a
	有意性 ^x	n.s.	*	*

^z 8:00~17:00の日最低気温の平均値を示す

^y 同一列の異なる英文字間にはTukeyの多重検定により、5%水準で有意差があり、花粉発芽率は逆正弦変換後に検定した

^x 分散分析により、*: 5%水準で有意差があり、n.s.: 有意差がない

表25 12~2月の最低昼温が促成栽培ナスの着果率、正常果収量および形状不良果率に及ぼす影響

区名	着果率 (%)	正常果収量 (kg/株) ^z	形状不良果率 (%) ^z
15°C	96.7	3.1 c	30.2 a
18°C	96.7	3.5 b	16.7 ab
21°C	100	3.9 a	17.7 ab
25°C	100	4.1 a	8.2 b
有意性 ^y	n.s.	*	*

^z分散分析により, *:5%水準で有意差があり, n.s.:有意差なし, 着果率と形状不良果率は

逆正弦変換後に検定した

^y分散分析により, *:5%水準で有意差があり, n.s.:有意差がない

以上の結果から、冬期の昼間に加温し、最低昼温を25°Cで栽培すると、15°C、18°Cおよび21°Cで栽培した場合に比べて稔性花粉重量が増加すると考えられる。

第3節 昼間の高温管理による稔性花粉量増加効果

本章第2節で、最低夜温を岡山県内産地の慣行温度の13°Cで管理し、昼間を最低25°Cの高温管理とすると稔性花粉重量が増加することを明らかにした。本節では最低昼温25°Cの高温管理における高温管理時間、最低夜温および換気温度の影響を検討し、効率的な昼間の高温管理方法について考察する。

材料および方法

1. 実験区

農業試験場内の本章第1節の実験で用いたプラスチックハウス内の小型プラスチックハウス内に定植したナス（品種：‘千両’，台木品種：‘台太郎’）を用いて実験した。

実験区の加温設定温度（表26）は、以下のとおりとした。対照区は岡山県の慣行に準じて6時から8時までを15°C、8時から17時までを15°C、17時から22時までを15°C、22時から6時までを13°Cとした。昼3時間高温区は11時から14時までを25°Cとし、14時から11時まで

を対照区と同じとした。昼全時間高温夜低温区は8時から17時までを25°Cとし、夜間を対照区より2~3°C低下させた。昼全時間高温区は8時から17時までを25°Cとし、夜間を対照区と同じとした。高温換気区は加温設定温度を対照区と同じとし、換気温度を4°C高く設定した。高温換気区を除き、換気扇が28°C以上になると作動するように設定した。

2004年9月10日に第1花房開花期の苗を株間75 cm、1条植えて1列に定植し、1区当たり4株ずつ供試した。本章第2節と同じ方法で開花中の花を指で弾いて授粉した。施肥には大塚化学製養液土耕2号および5号を用い、本章第2節と同様に行った。

2. 調査方法

12月6日、20日、2005年1月4日、17日、2月7日および21日の計6回、本章第2節と同じ方法で稔性花粉重量を調査した。果実調査についても本章第2節と同じ方法で行った。

結果

12月から2月までの1葯当たり花粉重量は、昼3時間高温区および昼全時間高温区がいずれも0.97 mgで、対照区の0.96 mgと同等であった ($p > 0.05$) (表27)。これら3区に比較して昼全時間高温夜低温区および高温換気区はともに0.84 mgで、有意に軽かった ($p < 0.05$)

表26 昼間の温度管理効果試験における処理区の設定温度

区名	加温設定温度 (°C)						換気設定温度 (°C)
	8:00 ~ 11:00	11:00 ~ 14:00	14:00 ~ 17:00	17:00 ~ 22:00	22:00 ~ 6:00	6:00 ~ 8:00	
昼3時間高温	15	25	15	15	13	15	28
昼全時間高温夜低温	25	25	25	13	10	15	28
昼全時間高温	25	25	25	15	13	15	28
高温換気	15	15	15	15	13	15	32
対照	15	15	15	15	13	15	28

表27 12～2月の昼間の高温管理における時間、夜温および換気温度が促成栽培ナスの稔性花粉重量に及ぼす影響

区名	平均気温 (°C) ^z	1葯当たり花粉重量 (mg)	花粉発芽率 (%)	1葯当たり稔性花粉重量 (mg)
昼3時間高温	24.0	0.97 a	62.3 a	0.60 a
昼全時間高温夜低温	24.8	0.84 b	51.4 ab	0.43 b
昼全時間高温	25.1	0.97 a	63.2 a	0.61 a
高温換気	25.1	0.84 b	47.8 b	0.40 b
対照	23.2	0.96 a	52.6 ab	0.50 ab
有意性 ^y		*	*	*

同一列の異なる英文字間にはTukeyの多重検定により、5%水準で有意差があり、花粉発芽率は逆正弦変換後に検定した

^z12～2月の昼間 (8:00～17:00) の平均気温を示す

^y分散分析により、* : 5%水準で有意差がある

表28 12～2月の昼間の高温管理における時間、夜温および換気温度が促成栽培ナスの着果率、正常果収量および形状不良果率に及ぼす影響

区名	着果率 (%)	正常果収量 (kg/株)	形状不良果率 (%)
昼3時間高温	100 a	5.0 ab	17.1 c
昼全時間高温夜低温	86.7 b	3.0 c	41.4 a
昼全時間高温	100 a	5.6 a	10.2 c
高温換気	100 a	4.2 bc	24.4 bc
対照	100 a	3.8 bc	34.8 ab
有意性 ^z	*	*	*

同一列の異なる英文字間にはTukeyの多重検定により、5%水準で有意差があり、着果率および形状不良果率は逆正弦変換後に検定した

^z分散分析により、* : 5%水準で有意差があり、n.s. : 有意差がない

(表27). 花粉の発芽率は、昼3時間高温区および昼全時間高温区が62.3%および63.2%と同等で、高温換気区 (47.8%) に比べて有意に高く ($p < 0.05$), 昼全時間高温夜低温区および対照区の51.4%および52.6%に比べて有意差はないが、やや高かった ($p > 0.05$) (表27). 1葯当たり稔性花粉重量は、昼3時間高温区および昼全時間高温区が0.60 mgおよび0.61 mgと同等で、昼全時間高温夜低温区の0.43 mgおよび高温換気区の0.40 mgに比べて有意に重く ($p < 0.05$), 対照区の0.50 mgに比べて有意差はないが、やや重かった ($p > 0.05$) (表27).

12月から2月までの昼間の平均気温は、昼3時間高温区、昼全時間高温夜低温区、昼全時間高温区、高温換気区および対照区で、それぞれ24.0°C, 24.8°C, 25.1°C, 25.1°Cおよび23.2°Cであった (表27).

着果率は、昼全時間高温夜低温区が86.7%で他区より有意に低く ($p < 0.05$), 他の4区はいずれも100%であった (表28). 1株当たりの正常果収量は、昼全時間

高温区が5.6 kgで最も多く、次いで多い順に昼3時間高温区が5.0 kg, 高温換気区が4.2 kg, 対照区が3.8 kgで、昼全時間高温夜低温区では3.0 kgと最も少なかった (表28). 形状不良果率は、昼全時間高温区が10.2%と最も低く、次いで低い順に昼3時間高温区 (17.1%), 高温換気区 (24.4%), 対照区 (34.8%) で、昼全時間高温夜低温区が41.4%と最も高かった (表28).

考察

本章第2節で、冬期の昼間に加温し、最低昼温25°Cで栽培すると、21°C, 18°Cおよび15°Cで栽培した場合に比べて、花粉重量は増加しなかったが、発芽率が高まり、稔性花粉重量は増加した (表25). この最低昼温25°Cの高温管理する時間を11時から14時までの3時間に限定しても、昼間の9時間高温管理した場合と同程度に花粉の発芽率は高く、稔性花粉重量も増加することが明らかになった. 一方、最低昼温を25°Cまで上昇させて栽培しても最低夜温を低くすると、花粉重量

が減少して稔性花粉重量が減少した。また、換気温度を高くしただけでは、花粉重量や稔性花粉重量の増加は認められなかった(表27)。これらのことから、昼間に高温管理しても10℃以下の低夜温管理をすると稔性花粉重量は減少する傾向がみられたことから、慣行の夜温を維持する必要があると考えられる。ナスの促成栽培の産地である岡山県南部では、晴天日の正午前後には無加温でもハウス内気温が25℃以上になる。そのため、11時から14時までの3時間だけを最低昼温25℃で高温管理しても、実際に加温機が稼働するのは曇雨天だけになるため、昼9時間25℃の高温管理する場合に比べて、暖房経費は著しく削減できる。

最低昼温25℃での高温管理を3時間に限定した場合の稔性花粉重量は、昼全時間高温管理した場合と差がなかったが、正常果収量および形状不良果率がやや劣った(表28)。斉藤(1974b)および橋本・前田(1998)は、受粉後の温度の違いによって花粉の発芽率や花粉管伸長が異なることを報告している。このことから、昼3時間高温区は昼全時間高温区に比べて受粉後の気温が低かったため、花粉の発芽率や花粉管伸長が劣り、正常果収量や形状不良果率が劣ったと推察される。今後、これらの影響について検討する必要がある。

第4節 花粉発芽に及ぼす温度の影響

花粉媒介昆虫を利用したナスの促成栽培では、冬期の収量低下や形状不良果の増加の原因は、十分な発芽能力を有する稔性花粉の生産量が冬期の低温環境において減少することにある(飛川, 2004)。本章第3節では、正午前後に施設内の最低昼温を3時間25℃で管理することにより、暖房コストの増加を抑えながら稔性花粉量を増加できることを明らかにした。しかし、3時間高温管理での果実収量と外観は9時間処理に比べて劣った。

ナス花粉の発芽と花粉管伸長の適温は25℃前後とされ、15℃では著しく劣り不受精となり、果実発育が不良となる(藤井・坂本, 1944a, b; 橋本・前田, 1998)ことから、受粉後に低温と遭遇した3時間高温管理の場合、花粉の発芽と花粉管の伸長が抑制されたため受精した種子数が減少し、形状不良果が増加した可能性がある。従って、ナスの促成栽培における冬期の果実収量と外観の向上には、花粉媒介昆虫による受粉後に花粉が発芽し花粉管が伸長して受精するまで低温に遭遇しないことが重要と考えられる。そこで、本節では花粉置床後の温度が花粉の発芽と花粉管伸長に及ぼす影響を検討した。

材料および方法

1. 置床後の適温での培養時間が花粉発芽と花粉管伸長に及ぼす影響

農業試験場内の第3章第1節の実験に用いたプラスチックハウス内に定植したナス(品種: '千両', 台木品種: '台太郎'または'トレロ')を用いて実験した。2005年9月7日に第1花房開花期の苗を株間75 cm, 1条植えて1列に定植し, 2株を供試した。加温設定温度は, 6時から11時までを15℃, 11時から12時までを25℃, 12時から22時までを15℃, 22時から6時までを13℃とし, 換気扇が28℃以上になると作動するように設定した。施肥には大塚化学製養液土耕2号および5号を用い, 1日1~2回施用した。1株当たりの総施肥量はNが97 g, P₂O₅が94 g, K₂Oが169 gであった。

2006年3月9日9時に開花1日以内の花を2株から3花ずつ合計6花採取し, 1花当たり5個ずつ合計30個の葯を採取し, 第2章第1節の方法で1シャーレ当たり10か所に置床した。

置床直後から発芽適温と考えられる25℃で1時間(以下, 25℃1時間区とする), 2時間(以下, 25℃2時間区とする)または3時間(以下, 25℃3時間区とする)培養した後, 全て15℃に移して培養した区, 15℃および25℃の恒温条件下で培養した区(以下, それぞれ15℃恒温区, 25℃恒温区とする)の5区を設け, 置床1時間後, 2時間後, 3時間後, 24時間後および48時間後の花粉発芽率と置床48時間後の花粉管長を調査した。培養はすべて暗黒条件下で行った。1視野中における花粉の発芽率は下式①により, 平均花粉管長は下式②により求めた。

$$\text{発芽率} = (\text{発芽花粉粒数} / \text{全花粉粒数}) \times 100 \text{ --- ①}$$

$$\text{平均花粉管長} = \text{発芽花粉管長の合計} / \text{発芽花粉粒数} \text{ --- ②}$$

1区当たり2シャーレを用い, 1シャーレ当たり花粉を置床した10か所, 計20か所の発芽率および花粉管長を測定した。

2. 置床後の適温遭遇時期が花粉発芽および花粉管伸長に及ぼす影響

2006年4月18日に前項1の方法で花粉を採取し, 寒天培地上に48時間置床した。培養温度15℃を基本とし, 培養途中25℃で1時間培養する時期が, 置床直後の区(以下, 置床直後区とする), 置床1時間後の区(以下, 置床1時間後区とする), 24時間後の区(以下, 置床24時間後区とする), 常時15℃恒温の区(以下, 15℃恒温区とする)および常時25℃恒温の区(以下, 25℃恒

温区とする)の5区を設け、置床48時間後に花粉発芽率および花粉管長を調査した。すべて暗黒条件下で培養した。前項1の同じ方法で花粉発芽率および花粉管長を測定・算出した。

結果

1. 置床後の適温での培養時間が花粉発芽と花粉管伸長に及ぼす影響

25℃恒温区の花粉の発芽率は、置床1時間後で55.2%、2時間後には80.4%に達し、24時間後で86.2%、48時間後で88.4%であった(表29)。一方、15℃恒温区では、置床3時間後までほとんど発芽がみられず、24時間後で49.2%、48時間後で58.8%と有意に低かった($p < 0.05$) (表29)。25℃1時間区、25℃2時間区および25℃3時間区の発芽率は、24時間後が83.3~87.1%、48時間後が86.1~89.6%となり、いずれも25℃恒温区との間に有意差は認められなかった($p > 0.05$) (表29)。置床48時間後の各区の発芽した花粉の平均花粉管長は、

0.62~0.84 mmで、培養温度の違いによる有意な差は認められなかった($p > 0.05$) (表29)。

2. 置床後の適温遭遇時期が花粉発芽および花粉管伸長に及ぼす影響

置床直後区の置床48時間後の花粉発芽率は70.6%で、25℃恒温区の81.6%に比べて有意に低かった($p < 0.05$) が、置床1時間後区の50.8%、置床24時間後区の35.5%よりも有意に高かった($p < 0.05$) (表30)。

置床直後区と25℃恒温区の置床48時間後の花粉管長は0.74 mmおよび1.11 mmで両区間に有意差は認められなかった($p > 0.05$) (表30)。しかし、置床1時間後区および置床24時間後区の花粉管長は0.47 mmおよび0.50 mmで15℃恒温区の0.52 mmと同等となり、25℃恒温区に比べて有意に短かった($p < 0.05$) (表30)。

考察

本章第3節の実験では、ハウス内の気温を11時から14時までの3時間を25℃以上に高めると8時から17時ま

表29 置床後の適温(25℃)での培養時間がナスの花粉発芽と花粉管伸長に及ぼす影響

区名	花粉発芽率 (%)					花粉管長 (mm)
	1時間後	2時間後	3時間後	24時間後 ²	48時間後 ²	48時間後
25℃恒温	55.2	80.4	85.1	86.2 a	88.4 a	0.75
15℃恒温	0	0.5	4.1	49.2 b	58.8 b	0.62
25℃1時間 ¹	—	—	—	83.3 a	89.6 a	0.84
25℃2時間 ¹	—	—	—	87.0 a	87.5 a	0.84
25℃3時間 ¹	—	—	—	87.1 a	86.1 a	0.67
有意性 ³	—	—	—	*	*	n.s.

¹同一列の異なる英文字間にはTukeyの多重検定により、5%水準で有意差があり、検定は逆正弦変換後に行った

²置床後直ちに25℃でそれぞれの時間培養した後15℃に移し、置床48時間後まで培養した

³分散分析により、* : 5%水準で有意差があり、n.s. : 有意差がない

表30 置床後のナス花粉の適温遭遇時間が花粉発芽と25℃における培養開始時間が寒天培地上の花粉発芽と花粉管伸長に及ぼす影響

区名	花粉発芽率 (%)	花粉管長 (mm)
25℃恒温	81.6 a	1.11 a
15℃恒温	37.0 d	0.52 b
置床直後 ²	70.6 b	0.74 ab
置床1時間後 ²	50.8 c	0.47 b
置床24時間後 ²	35.5 d	0.50 b
有意性 ³	*	*

同一列の異なる英文字間にはTukeyの多重検定により、5%水準で有意差があり、花粉発芽率は逆正弦変換後に検定した

²25℃での培養は1時間行い、その時間以外の培養温度は15℃とした

³分散分析により、* : 5%水準で有意差があり、n.s. : 有意差がない

で9時間25℃以上に高めた区と同量の稔性花粉が生産されていた。しかし、3時間だけ25℃以上に気温を高めた区の収量および果実外観は9時間高めた区に比べて劣った。この実験では、指で弾いての人工授粉を9時に行ったため、25℃以上に9時間高めた場合は受粉後8時間25℃以上の気温であったが、11時から14時までの3時間の高温管理では受粉後からの2時間の加温設定温度は15℃であり、曇雨天日には受粉直後から15℃程度の低温に数時間遭遇していた。表30に示した花粉の培養実験の結果から、花粉を置床後15℃で培養すると花粉発芽の適温である25℃での培養に移すまでの時間が長いほど発芽率は低下した。また、置床直後に25℃で1時間培養した後15℃で47時間保持した置床直後区は、25℃恒温で48時間培養した25℃恒温区の発芽率81.6%に近い70.6%の発芽率が得られた。しかし、15℃で1時間培養した後25℃に移して1時間培養して、その後15℃で46時間培養した置床1時間後区の発芽率は50.8%と低かった。このことから、置床直後から1時間の低温は花粉の発芽率と花粉管の伸長を大きく悪化させると考えられる。これらから、果実内の種子数の減少、収量および果実外観の低下は、受粉直後の低温遭遇により花粉の発芽や花粉管の伸長が悪化することで、受精率が低下したことが原因と考えられる。また、表29に示した花粉の培養実験の結果から、置床直後の1時間だけ25℃で培養すると、花粉発芽および花粉管伸長は、適温である25℃に常時保持した場合と差がなかった。

これらは寒天培地上での結果であるが、実際の栽培においても、施設内の気温を受粉直後に最低1時間を花粉の発芽適温に維持すれば、花粉媒介昆虫を用いて冬期に良好な収量と品質の果実が収穫できる可能性が示唆された。

第5節 受粉時の気温が収量および果実外観に及ぼす影響

本章第4節の花粉培養の結果から、受粉直後の低温は花粉発芽と花粉管の伸長を抑制し、このことで果実

内の種子数が減少し、収量および果実外観が低下することが示唆された。また、施設内の気温を受粉直後に最低1時間花粉発芽の適温に維持できれば、冬期にも花粉媒介昆虫を利用できる可能性が示された。

そこで、本節では実際に促成栽培ナスを用いて、最低昼温25℃の高温管理を実施する場合に適したセイヨウオオマルハナバチによる受粉時刻を検討した。

材料および方法

1. 昼間の高温管理に適した受粉時刻

(1) 実験区

農業試験場内の本章第1節の実験に用いたプラスチックハウス内の小型プラスチックハウス内に定植したナス（品種：‘千両’，台木品種：‘台太郎’）を用いて実験した。表31に示したように各小型ハウスの昼間の加温設定温度（対照：15℃，高温：25℃）と受粉時刻（朝：8時30分，昼：11時15分）を組み合わせた5区を設けた。対照区は岡山県内産地の慣行に準じ、8時から17時までを15℃とし、8時30分に授粉した。夜間の加温設定温度は、各区とも17時から22時までを15℃、22時から6時までを13℃、6時から8時までを15℃とし、換気扇が28℃以上になると作動するように設定した。加温には電熱温風ヒーターを用いた。

2005年9月12日に第1花房開花期の苗を株間75 cm，1条植えて1列に定植し、各区とも4株を供試した。受粉に適した時刻を明らかにするため、本実験では花粉媒介昆虫を放飼せず、本章第2節と同様の方法で人為的に受粉させた。実験は2005年9月20日～2006年2月28日に実施し、開花中の花を2～3日間隔で1花当たり5回、指で弾いて受粉させた。全区の受粉作業は約10分で完了した。施肥には大塚化学製養液土耕2号および5号を用い、1日1～2回施用した。1株当たりの施肥量はNが97 g，P₂O₅が94 g，K₂Oが169 gであった。

(2) 調査方法

1) 稔性花粉重量

12月5日，21日，2006年1月9日，22日，2月5日および23日の合計6回，稔性花粉重量を調査した。異なる

表31 各処理区の加温開始温度と受粉時刻

区名	加温開始温度 (°C)										受粉時刻	
	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00		
1時間高温	←		15	→		25	←		15	→		11:15
3時間高温・昼受粉	←		15	→		25	←		15	→		11:15
3時間高温・朝受粉	←		15	→		25	←		15	→		8:30
9時間高温	←					25	→					8:30
対照 (現地慣行)	←					15	→					8:30

株の5花から1区当たり10個の葯を採取し、第2章第1節と同じ方法で稔性花粉重量を求めた。

2) 果実調査

第2章第2節と同じ方法で12月1日から2月28日まで果実を調査した。また、12月1日、16日、31日、1月16日、31日および2月14日に開花した花について、各開花日とも6花ずつを対象に着果率および果実1個当たりの種子数を調査した。

2. 昼間の高温管理に適したセイヨウオオマルハナバチの放飼時間帯

(1) 実験区

農業試験場内の第3章第1節の実験に用いたプラスチックハウス内に定植したナス（品種：‘千両’，台木品種：‘台太郎’）を用いて実験した。ハウスには第3章第1節と同じ方法で2等分した区画を設け、2005年9月7日に第1花房開花期の苗を株間75 cm，1条植えて2列に定植し、両区とも24株ずつ供試した。両区にはセイヨウオオマルハナバチの巣箱を区中央の高さ40 cmの台の上に1箱ずつ設置し、それぞれ昼区および朝区とした。昼区では11時15分から11時45分まで、朝区では8時30分から9時まで、ともに30分間ずつ巣の出口を開放してセイヨウオオマルハナバチを放飼した。上記の時間以外は巣出口を閉鎖し、巣入口を常時開放とした。ワーカーは巣出口閉鎖後30分から1時間以内に帰巢した。

加温設定温度は、6時から11時までを15℃，11時から12時までを25℃，12時から22時までを15℃，22時から6時までを13℃とし、28℃以上で換気扇が作動するように設定した。前項1と同じ方法で施肥を行った。

(2) 調査方法

前項1と同じ方法で12月1日から2月28日まで果実調

査を行った。

結果

1. 昼間の高温管理に適した受粉時刻

12月から2月までの8時から17時までの平均気温は、1時間高温区が23.1℃，3時間高温・昼受粉区が23.8℃，3時間高温・朝受粉区が23.9℃，9時間高温区が25.4℃，対照区が23.0℃であった（表32）。加温機の稼働中は設定温度±1℃程度でハウス内気温が推移することから、各区の25℃高温管理中のハウス内気温が加温設定温度±1℃で推移していた時間を加温機の稼働時間と仮定し、12月から2月まで設定温度±1℃で推移していた時間の合計を昼間の加温機の稼働時間とした。その結果、昼間の加温機の稼働時間は9時間高温区では434時間であったが、1時間高温区では40時間、3時間高温管理した両区は91～95時間と短かった（表32）。なお、対照区（昼間15℃加温）の稼働時間は16時間であった。

3時間高温・昼受粉区，3時間高温・朝受粉区および9時間高温区の1葯当たり稔性花粉重量は、それぞれ0.51 mg，0.49 mgおよび0.54 mgで処理区間に有意差は認められなかった（ $p > 0.05$ ）（表32）。1時間高温区の稔性花粉重量は0.37 mgで、3時間高温・昼受粉区，3時間高温・朝受粉区および9時間高温区に比べると有意に軽かったが、対照区の0.25 mgよりも有意に重かった（ $p < 0.05$ ）（表32）。

着果率は、1時間高温区，3時間高温・昼受粉区，3時間高温・朝受粉区および9時間高温区がいずれも95.2%，対照区が90.5%で区間に有意な差は認められなかった（ $p > 0.05$ ）（表33）。果実1個当たりの種子数は、3時間高温・昼受粉区および9時間高温区が最も多

表32 昼間の高温管理および受粉時刻が12～2月の促成栽培ナスの稔性花粉重量に及ぼす影響

区名	平均 昼温 (°C) ^z	加温機の稼働 時間 (h) ^y	1葯当たり 花粉重量(mg)	花粉発芽 率 (%) ^x	1葯当たり稔性 花粉重量 (mg) ^x
1時間高温	23.1	40	0.88	41.6 b	0.37 b
3時間高温・昼受粉	23.8	91	0.93	54.6 a	0.51 a
3時間高温・朝受粉	23.9	95	0.93	52.3 a	0.49 a
9時間高温	25.4	434	0.92	57.7 a	0.54 a
対照 (現地慣行)	23.0	16	0.82	29.1 c	0.25 c
有意性 ^w			n.s.	*	*

^z8:00～17:00の平均気温を示す

^y高温処理時間中のハウス内温度が加温設定温度（±1℃）で推移した積算時間を示す

^x同一列の異なる英文字間にはTukeyの多重検定により、5%水準で有意差がある。花粉発芽率は逆正弦変換後に検定した

^w分散分析により、*：5%水準で有意差があり、n.s.：有意差がない

表33 昼間の高温管理および受粉時刻が12~2月の促成栽培ナスの着果率および果実1個当たりの種子数に及ぼす影響

区名	着果率 (%)	1果当たり種子数 (粒) ^z
1時間高温	95.2	649 b
3時間高温・昼受粉	95.2	946 a
3時間高温・朝受粉	95.2	755 b
9時間高温	95.2	1044 a
対照 (現地慣行)	90.5	313 c
有意性 ^y	n.s.	*

^z 同一列の異なる英文字間にはTukeyの多重検定により、5%水準で有意差があり、着果率は逆正弦変換後に検定した

^y 分散分析により、* : 5%水準で有意差があり、n.s. : 有意差がない

表34 昼間の高温管理および受粉時刻が12~2月の促成栽培ナスの正常果収量および形状不良果率に及ぼす影響

区名	正常果収量 (kg/株)	形状不良果率 (%)
1時間高温	3.6 b	29.1 b
3時間高温・昼受粉	4.6 a	12.9 c
3時間高温・朝受粉	3.5 b	29.8 b
9時間高温	4.8 a	10.4 c
対照 (現地慣行)	2.9 c	43.8 a
有意性 ^z	**	*

同一列の異なる英文字間にはTukeyの多重検定により、5%水準で有意差があり、形状不良果率は逆正弦変換後に検定した

^z 分散分析により、*、** : 5%、1%の水準で有意差があり

く、それぞれ946粒および1044粒で両区に有意差は認められなかった ($p > 0.05$) (表33)。次いで、1時間高温区および3時間高温・朝受粉区がそれぞれ649粒および755粒であり、両区間に有意差は認められなかった ($p > 0.05$) が、3時間高温・昼受粉区および9時間高温区に比べると有意に少なかった ($p < 0.05$) (表33)。対照区は313粒とその他の全ての処理区に比べて有意に少なかった ($p < 0.05$)。

1株当たりの正常果収量は、3時間高温・昼受粉区および9時間高温区が最も多く、それぞれ4.6 kgおよび4.8 kgで両区に有意差は認められなかった ($p > 0.05$) (表34)。次いで、1時間高温区および3時間高温・朝受粉区がそれぞれ3.6 kgおよび3.5 kgであり、両区間に有意な差はなかった ($p > 0.05$) が、3時間高温・昼受粉区および9時間高温区に比べると有意に少なかった ($p < 0.05$) (表34)。対照区は2.9 kgと最も少なく、その他の処理区との間に有意な差があった ($p < 0.05$) (表34)。形状不良果率は、3時間高温・昼受粉区および9時間高温区が最も低く、12.9%および10.4%で両区に有意差

は認められなかった ($p > 0.05$) (表34)。次いで、1時間高温区および3時間高温・朝受粉区がそれぞれ29.1%および29.8%であり、両区間に有意な差はなかった ($p > 0.05$) が、3時間高温・昼受粉区および9時間高温区に比べると有意に高かった ($p < 0.05$) (表34)。対照区は43.8%と最も高く、その他の処理区との間に有意な差があった ($p < 0.05$) (表34)。

2. 昼間の高温管理に適したセイヨウオオマルハナバチの放飼時間帯

セイヨウオオマルハナバチによるバイトマークはほぼ全花に認められた。朝区と昼区の1株当たりの正常果収量は、いずれも5.6 kgで有意な差は認められなかった ($p > 0.05$) が、朝区と昼区の形状不良果率はそれぞれ6.7%、5.4%で、昼区が朝区に比べて有意に低かった ($p < 0.05$) (表35)。

考 察

施設内で昼間の3時間の最低気温を花粉発芽の適温である25℃の高温で管理し、この高温にした15分後に

表35 昼1時間高温管理におけるセイヨウオオマルハナバチの放飼時間帯が12~2月の促成栽培ナスの正常果収量、上物率および形状不良果率に及ぼす影響

区名	放飼時間帯 ²	正常果収量 (kg/株)	形状不良果率 (%)
朝	8:30~ 9:00	5.6	6.7
昼	11:15~11:45	5.6	5.4
有意性 ³		n.s.	*

² 巢出口を開放した時間、巢入口は常時開放とした

³ 分散分析により、* : 5%水準で有意差があり, n.s. : 有意差がない

人為的に授粉した場合には、9時間高温管理と同等の着果率、種子数、正常果収量が得られ、形状不良果率も同等に低かった（表33, 34）。また、3時間の高温管理に比べて効果は劣るが、1時間の高温管理でも施設内の最低気温を15℃で維持する対照区（慣行栽培）に比べて、種子数、正常果収量の増加および形状不良果の低下が認められた（表33, 34）。

実際の栽培で一般に使用されるセイヨウオオマルハナバチによって受粉したナスでは、25℃の高温管理の時間帯とセイヨウオオマルハナバチ放飼の時間帯が異なった場合には、正常果収量は低下しなかったが、形状不良果率がやや高まった（表35）。そのため、形状不良果率を低下させるには、高温管理時間とセイヨウオオマルハナバチの放飼時間帯を合わせることが重要であると考えられる。ただし、数時間の高温管理中にセイヨウオオマルハナバチによる受粉を完了させるためには、放飼可能時間が短くなるために、常時放飼に比べてコロニー当たりの受粉可能面積が小さくなると考えられる。今後、実用規模での受粉可能面積の検討が必要である。

本実験の実施時に調査した施設内の気温の変動に基づき、加温設定温度の付近で気温が推移した時間を加温機の稼働時間として加温期の稼働時間を推定すると、昼の高温管理時間を1~3時間とした場合の加温機の稼働時間は、9時間処理の10~20%にまで短縮でき、暖房コストを大幅に削減できることが示唆された。

第6節 保温性を高めた施設におけるセイヨウミツバチの受粉効果

特定外来生物に指定されたセイヨウオオマルハナバチの代替花粉媒介昆虫として、ナスの促成栽培では主にセイヨウミツバチが利用されている（農林水産省生産局野菜課, 2005）。しかし、セイヨウオオマルハナバチと異なり振動採粉しないセイヨウミツバチによる受粉では、低温期に稔性花粉量が減少すると形状不良

果が増加する（第3章第2節）。このため、冬期にはセイヨウオオマルハナバチが導入されているが、その導入には余分のコストが必要になり、導入時期の判断も難しい。さらに、短期間の使用であっても、使用許可や逃亡防止のために施設の改装が必要になるなど問題点が多い。

低温期の稔性花粉量の減少を抑制できれば冬期であってもセイヨウミツバチの利用が可能になる。冬期に昼間の施設内気温を高めると稔性花粉重量が増加する（飛川, 2007）が、加温機による加温では、燃料費が増加する。最近、省エネルギー技術として、パイプハウスにフィルムを2枚重ねて張り、その間にブロワーで加圧した空気を注入して、断熱層を作って保温する空気膜ハウスが各地で導入されている（島地, 2007; 吉田, 2008）。この空気膜ハウスでは暖房用燃料の消費量が約30%削減できるとされているが、保温性が高まるため昼間の施設内気温を高める効果も期待できる。そこで、空気膜ハウスを利用して昼間の施設内気温を高めることが、セイヨウミツバチの受粉効果にどのような影響を及ぼすかを検討した。

材料および方法

1. 実験区

農業試験場内の第3章第1節と同形状のプラスチックハウス2棟内に定植したナス（品種：‘千両’、台木品種：‘台太郎’）を用いて実験した。2007年8月1日に1棟のハウスの屋根面に厚さ0.1 mmのポリオレフィン製フィルム2枚（東罐興産（株）社製、商品名：ふくら一夢）を展張し、2枚のフィルムの間に常時空気を送り、内圧を約100 Paに保って膨らませて空気膜ハウスとした。もう1棟のハウスの屋根面には、厚さ0.15 mmのポリオレフィン製フィルム（MKVプラテック（株）社製、商品名：ダイヤスター）1枚を展張し慣行ハウスとした。さらに、11月15日に両ハウスの内側に間口5.5 m、奥行20.5 m、高さ2.7 mで厚さ0.05 mmの透明

ビニルを展張した。

両ハウスには第3章第1節と同じ方法で等分した2区画を設けた。11月22日にセイヨウミツバチの巣箱およびセイヨウオオマルハナバチの巣箱を区中央の高さ40 cmの台の上に1箱ずつ設置し、それぞれミツバチ区およびマルハナバチ区とした。実験期間中、セイヨウオオマルハナバチのコロニーが衰退し始めたので、2008年1月29日にコロニーを更新したが、セイヨウミツバチのコロニーは衰退が見られなかったため更新しなかった。

9月7日に第1花房開花期の苗を株間75 cm、畝間2 m、1条植えて2列に定植し、各区とも22株ずつ供試した。加温設定温度は、6時から22時までを15℃、22時から6時までを13℃とし、換気扇が28℃以上になると作動するように設定した。施肥には大塚化学(株)社製の養液土耕2号および5号を用い、1日1~2回施用した。9月7日から2008年2月29日の1株当たりの施肥量はNが72 g、P₂O₅が86 g、K₂Oが125 gであった。

2. 調査方法

(1) 稔性花粉重量

12月3日、17日、1月4日、15日、28日、2月12日および25日の合計7回、稔性花粉重量を調査した。異なる株の15花から30葯を採取し、第2章第1節と同じ方法で稔性花粉重量を求めた。

(2) 果実調査

第2章第2節と同じ方法で12月1日から2月29日まで果実を調査した。また、12月3日、17日、1月4日、15日、28日、2月12日および25日の合計7回、同日に開花した

1区当たり15個の中・長花柱花の着果率および果実1個当たりの種子数を調査した。

(3) 短花柱花率、短花柱花および中・長花柱花の着果率

空気膜ハウスでは慣行ハウスに比べて照度の低下が予想される。照度が低下するとナスの花の発育は悪くなり、長花柱花が減少して、短花柱花の発生が多くなる(斎藤・伊東, 1973)。そのため、12月18日、1月8日、1月28日および2月18日に1区当たり60花について、短花柱率を調査した。また、1月28日に開花した花の短花柱花および中・長花柱花について着果率を調査した。

結果

12月から2月までの昼間の平均気温は、空気膜ハウスの8時から17時までが22.6℃、11時から14時までが25.7℃で、慣行ハウスの8時から17時までが21.9℃、11時から14時までが24.9℃であった(表36)。11時から14時までの最低気温が25℃以上であった日数は、空気膜ハウスが37日、慣行ハウスが8日で、空気膜ハウスは慣行ハウスに比べて有意に多かった($p < 0.05$) (表36)。12月から2月までのハウス内平均照度は、空気膜ハウスが15.6 klx、慣行ハウスが17.2 klxで、空気膜ハウスの平均照度は慣行ハウスの90.7%であった(表37)。

1葯当たり稔性花粉重量は空気膜ハウスが0.50 mg、慣行ハウスが0.40 mgで、空気膜ハウスの1葯当たり稔性花粉重量は慣行ハウスに比べて有意に重かった($p < 0.05$) (表38)。

表37 空気膜ハウスと慣行ハウスの12~2月の平均照度

ハウスの種類	平均照度 (klx)	慣行ハウスに対する比率 (%)
空気膜ハウス	15.6	90.7
慣行ハウス	17.2	100

表38 ハウスの種類の違いが12~2月の促成栽培ナスの稔性花粉重量に及ぼす影響

ハウスの種類	1葯当たり稔性花粉重量 (mg)
空気膜ハウス	0.50
慣行ハウス	0.40
有意性 ²	*

²分散分析により、*: 5%水準で有意差がある

表39 ハウスの種類とポリネーターの違いが12~2月の促成栽培ナスの着果率および種子数に及ぼす影響

ハウスの種類	ポリネーター	着果率 (%)	1果当たり種子数 (粒) ²
空気膜ハウス	ミツバチ	96.7	1036 a
	マルハナバチ	94.2	1041 a
慣行ハウス	ミツバチ	96.7	682 b
	マルハナバチ	97.5	992 a
有意性 ²		n.s.	*

²同一列の異なる英文字間にはTukeyの多重検定により、5%水準で有意差があり、着果率は逆正弦変換後に検定した

²分散分析により、*: 5%水準で有意差があり、n.s.: 有意差がない

表40 ハウスの種類とポリネーターの違いが12~2月の促成栽培ナスの正常果収量および形状不良果率に及ぼす影響

ハウスの種類	ポリネーター	正常果収量 (kg/株)	形状不良果率 (%)
空気膜ハウス	ミツバチ	5.5 b	8.0 b
	マルハナバチ	5.5 b	8.3 b
慣行ハウス	ミツバチ	6.0 a	14.5 a
	マルハナバチ	6.2 a	9.3 b

同一列の異なる英文字間にはTukeyの多重検定により、5%水準で有意差があり、形状不良果率は逆正弦変換後に検定した

表41 ハウス被覆の方法の違いが促成栽培ナスの短花柱花の発生率ならびに短花柱花および中・長花柱花における着果に及ぼす影響

ハウスの種類	短花柱花率 (%) ^z				着果率 (%)	
	12月18日	1月8日	1月28日	2月18日	短花柱花	中・長花柱花
空気膜ハウス	1.2	9.9	39.2	0.0	0.0	89.9
慣行ハウス	0.0	5.3	25.8	0.8	0.0	87.9
有意性 ^y	n.s.	*	*	n.s.	n.s.	n.s.

^z短花柱花率=短花柱花数/(短花柱花数+中・長花柱花数)×100

^yχ²検定により、*: 5%水準で有意差があり、n.s.: 有意差がない

中・長花柱花の着果率は、空気膜ハウス・ミツバチ区、空気膜ハウス・マルハナバチ区、慣行ハウス・ミツバチ区および慣行ハウス・マルハナバチ区がそれぞれ96.7%、94.2%、96.7%および97.5%で、各区間に有意な差は認められなかった ($p > 0.05$) (表39)。果実1個当たりの種子数は、空気膜ハウスのミツバチ区、空気膜ハウスのマルハナバチ区および慣行ハウスのマルハナバチ区がそれぞれ1036粒、1041粒および992粒で、これらの各区間に有意差は認められなかった ($p > 0.05$) が、慣行ハウスのミツバチ区は682粒で他の3区に比べて有意に少なかった ($p < 0.05$) (表39)。

空気膜ハウスの1株当たりの正常果収量は、両区ともに慣行ハウスに比べて有意に少なかった ($p < 0.05$) (表40)。空気膜ハウスの1株当たりの正常果収量は、ミツバチ区およびマルハナバチ区ともに5.5 kgで有意差は認められなかった ($p > 0.05$) (表40)。慣行ハウスの1株当たりの正常果収量についても、ミツバチ区が6.0 kg、マルハナバチ区が6.2 kgで両区間に有意差は認められなかった ($p > 0.05$) (表40)。形状不良果率は、慣行ハウスのミツバチ区が14.5%で他の区に比べて有意に高かった ($p < 0.05$) (表40)。しかし、空気膜ハウスのミツバチ区、空気膜ハウスのマルハナバチ区および慣行ハウスのマルハナバチ区の形状不良果率は、それぞれ8.0%、8.3%および9.3%で、これらの各区間に

有意差は認められなかった ($p > 0.05$) (表40)。

短花柱花は12月18日と2月18日には少なく、空気膜ハウスが1.2%および0%、慣行ハウスが0%および0.8%でこれらに有意差は認められなかった ($p > 0.05$) (表41)。1月8日と1月28日には短花柱花率が高く、ミツバチ区とマルハナバチ区を平均した値は、空気膜ハウスが9.9%および39.2%、慣行ハウスが5.3%および25.8%で、これら両日の空気膜ハウスの短花柱花の発生率は、慣行ハウスに比べて有意に高かった ($p < 0.05$) (表41)。また、1月28日の短花柱花には両ハウスともに全く着果しなかったが、中・長花柱花の着果率は空気膜ハウスが89.9%、慣行ハウスが87.9%と高く、両ハウスに有意差は認められなかった ($p > 0.05$) (表41)。

考 察

ナスの促成栽培で昼間の高温管理によって最低昼温25℃以上で栽培すると稔性花粉重量が増加し、その際の処理時間は11時から14時までの3時間だけでも、8時から17時までの9時間処理した場合と同様の効果がある(飛川, 2007, 2008a)。空気膜ハウスでは、11時から14時までの3時間の最低気温が25℃以上であった日数が慣行ハウスに比べて顕著に増加したために、本章第3節での11時から14時までの3時間の最低気温を25℃

以上で栽培した場合と同様に、空気膜ハウスにおいて稔性花粉重量が慣行ハウスに比べて増加したと考えられる。第4章第2節でナスの促成栽培の収量および形状不良果の発生に及ぼすミツバチによる受粉の影響を検討し、収量はマルハナバチと同等であるが、1葯当たり稔性花粉重量が0.50 mg以下になると形状不良果が増加することを明らかにした。本節でも、1葯当たり稔性花粉重量が0.40 mgと少なかった慣行ハウスのミツバチ区での形状不良果率は、マルハナバチ区に比べて高く、種子数も少なかった。一方、1葯当たり稔性花粉重量が0.50 mgあった空気膜ハウスでは、ミツバチ区とマルハナバチ区の種子数、正常果収量および形状不良果率は同等であった（表39, 40）。本実験の空気膜ハウスの稔性花粉重量は、第3章第2節で明らかにしたセイヨウミツバチによる受粉で必要とされる境界の重量であり、必ずしも十分な量ではない。受粉直後の低温遭遇はナスの胚珠の受精を抑制する（本章第4節）。空気膜ハウスでは、8時から17時の平均気温が慣行ハウスに比べて約1℃高かったことから、受粉直後に低温に遭遇する確率は慣行ハウスに比べて低かったと考えられる。そのため、空気膜ハウスでは、胚珠の受精が良好で種子数が多くなり、稔性花粉重量が不十分でも形状不良果が減少したと推察される。以上のことから、空気膜ハウスでは昼間の施設内気温が高まり、稔性花粉重量が増加するとともに、受粉直後の低温遭遇率も低下したため、ミツバチの受粉効果はマルハナバチと同等になったと考えられる。

空気膜ハウスでの正常果収量は、花粉媒介昆虫の種類に関わらず減少した（表40）。本章第2節、第3節および第5節の実験では、加温機による昼間の高温管理によって正常果収量が増加しており、昼間の気温上昇によって空気膜ハウスの正常果収量が減少したとは考えにくい。しかし、本実験で使用した空気膜ハウスでは慣行ハウスに比べて照度が10%程度低下した。照度が低下するとナスの花の発育も悪くなり、長花柱花が減少して、短花柱花の発生が順次多くなる（斉藤・伊東, 1973）。今回の実験でも、1月の寡日照期に空気膜ハウスの短花柱花の発生率は慣行ハウスに比べて高まった（表41）。ナスの花は下向きに開花するため、柱頭が葯筒内に埋没している短花柱花は、花粉媒介昆虫による受粉が中・長花柱花に比べて困難で着果しにくい。そのため、照度の低下による短花柱花の増加が、空気膜ハウスでの正常果収量の減少の一因と推察される（表41）。また、空気膜ハウスでは、寡日照期に着色不良が問題になることがある（飛川, 未発表）。これらのことから、促成栽培ナスでは慣行ハウスに匹敵する光線透過率の得られる空気膜ハウス用のフィルムの開発が今後望まれる。また、ナスの体内窒素が不足すると短花柱花率が高まり（斉藤・伊東, 1973）、CO₂施用などによって生育を促進させると長花柱花率が高まる（今津ら, 1967）ことから、栽培管理により草勢を増強できれば冬期の長花柱花を増やすことは可能となり、セイヨウミツバチの利用も容易になる考えられる。

第6章 総合考察

1. 本研究で供試した花粉媒介昆虫3種の利用上の特徴

トマトおよびナスの受粉に花粉媒介昆虫を周年利用することを目的に本研究を実施した。その結果を整理して、表42にセイヨウオオマルハナバチ、セイヨウミツバチおよびキオビオオハリナシバチの利用上の特徴とこれらの花粉媒介昆虫を周年利用するための条件を示した。セイヨウオオマルハナバチとキオビオオハリナシバチのトマトおよびナスからの採粉能力は同等である(第4章)。ただし、キオビオオハリナシバチは、高温でトマトの稔性花粉量が減少すると訪花率が低下する傾向が認められた。また、キオビオオハリナシバチの花粉採餌行動が本格的に見られるのは16~20℃以上で(郷原・飛川、未発表)、セイヨウオオマルハナバチの5~6℃(松浦、1998)より高く、冬期の曇天日などはトマトやナスの施設内の最高気温が終日16℃未満のこともあり、その場合は採餌時間帯の施設内の気温を高くする必要がある。しかし、ナス栽培の場合、低温期に昼間の最低気温を高めることは、稔性花粉量を増加させる効果があり、いずれの花粉媒介昆虫を用いても受粉効果を高める利点があり(第5章)、後述のように収量増加による経済的な価値を伴う方法である。トマトおよびナスは振動で花粉を飛散させ受粉するため、振動採粉できず葯から直接採粉するセイヨウミツバチは他の2種に比べて、授粉能力が劣る。特にトマトの開葯部は葯筒の内側にあり、セイヨウミツバチは開葯部からの直接採粉することも困難である。一方、ナスは葯の先端部分が開くため、開葯部から直接採粉可能である。そのため、ナスでは振動採粉する他の2種に比べてセイヨウミツバチの受粉効率は劣るが、気温が高く稔性花粉が豊富な時期には利用可能である。しかし、稔性花粉が不足する日最低気温15℃以下の低温期には、昼間の気温を高めて、稔性花粉量を確保する必要がある。

2. 花粉生成からみたトマトおよびナス栽培における花粉媒介昆虫の利用

花粉媒介昆虫の利用に関する研究は、昆虫の側からのアプローチが多く、それらは花粉媒介昆虫による受粉をうまく行わせることを主な研究目的としている(三原ら、1995; 串間ら、1999; Cauich et al., 2004; Whittington et al., 2004; Del Sarto et al., 2005; 宮本ら、2006)。本研究の特徴は、花粉媒介昆虫の利用を植物

栽培の側からアプローチした点にある。すなわち、花粉媒介昆虫が採餌に訪れた際、稔性花粉が十分柱頭に付着し、それらの発芽率と胚珠の受精率が高く、種子が十分形成され、その結果、果実の着果と肥大が良好に行われ、高い収量と果実品質を得ることを目的にして研究を実施した。

主な果菜類のうち、キュウリは単為結果性の品種の利用が主流である。ピーマンは自家受粉性が強いように種子数の多少が果実外観にあまり影響しないため、花粉媒介昆虫の利用は一般化していない。イチゴやメロンではセイヨウミツバチの利用が定着しており、周年、稔性花粉量が不足することはなく、ワーカーを活発に訪花させることができれば、生産上の問題はない。ところが、トマトおよびナスでは植物ホルモン剤によって単為結果させる着果処理法が定着しており、稔性花粉の生成に悪影響のある高温や低温条件下でも栽培可能である。しかし、花粉媒介昆虫を利用する場合、トマトは高温期に、ナスは低温期に稔性花粉量が不足し、花粉媒介昆虫の利用が困難と考えられている。しかし、高温期に施設内気温を十分低下させるのは実用上困難であることから、第2章第1節で高温期のトマト栽培で花粉媒介昆虫を利用できる限界の日平均気温を試験した結果、その気温は28℃であること明らかにした。一方、低温期にナスの稔性花粉を維持するのは、加温開始温度を高めることが有効であるが、より効率的な方法を試験した結果、昼間の11時から14時までの3時間だけ最低気温を25℃以上に高めることで実用的に十分な受粉効果があることを明らかにした(第5章第2節)。

トマト、ナスともに受粉によって安定した果実生産を行うためには、稔性花粉を豊富に生成させるだけでなく、株全体の生育状態が良好であることが前提になる。しかし、本研究ではトマト、ナスともに稔性花粉量が豊富にある場合は、少ない場合に比べて例外なく着果や果実品質が向上した(飛川、2004、2007、2008a、2008b; 飛川・石倉、2008; 飛川・宮永、2007; Hikawa and Miyanaga, 2009)ことから、稔性花粉量の確保はトマトおよびナスで花粉媒介昆虫を利用するための極めて重要な課題と考えられる。

3. トマト栽培における花粉媒介昆虫の利用

振動採粉しないセイヨウミツバチは、トマトからの採粉が困難(第3章第1節)である。このため、商品化されて一般に利用できる花粉媒介昆虫は、セイヨウオオマルハナバチおよびクロマルハナバチの2種である。

これに加えて、第4章第1節および第2節でキオビオオハリナシバチの受粉効果について検討し、セイヨウオオマルハナバチと同等の能力がキオビオオハリナシバチにあることを明らかにした。しかし、キオビオオハリナシバチは商品化されていないため、実用可能でセイヨウオオマルハナバチの代替となる花粉媒介昆虫は、在来種のクロマルハナバチだけである。本研究ではクロマルハナバチについて検討しなかったが、セイヨウオオマルハナバチの近縁種であり（片山，2007）、セイヨウオオマルハナバチやキオビオオハリナシバチと同様に振動採粉することから、有望なトマトの花粉媒介昆虫と考えられる。しかし、生態リスクに関する十分な研究例はないが、商品化のため大量増殖されたクロマルハナバチの遺伝的多様性が低下した在来個体群の放飼には、地域個体群の遺伝的多様性を損なう可能性が指摘されており（五箇，2002；米田ら，2008）、むしろ同種の野生集団に対する影響は、外来種との間に生じる種間競争よりも深刻な影響を与える恐れもある（国武・五箇，2006；米田ら，2008）。従って、施設外への逃亡防止措置などのセイヨウオオマルハナバチを利用する上で求められる対策は、クロマルハナバチを利用する際にも必要である。一般的な逃亡防止策は、施設の開口部へのネット展張であり、セイヨウオオマルハナバチの逃亡防止効果（米田ら，2007）と展張技術（小出ら，2008）は既に明らかにされている。ネット展張は単にワーカーの逃亡を防止するだけでなく、施設外の植物からの採餌を防止してトマトに対するワーカーの安定した授粉を確保する（Whittington et al., 2004；米田ら，2007）とともに、オオタバコガなどの大型のチョウ目害虫の侵入を抑制する優れた防除効果をもたらす（田中ら，1998）などの付加的な利点もある。

収穫が長い期間高温期にあたる雨除け栽培でのセイヨウオオマルハナバチの利用は、他の作型に比べると十分に普及していない。これは、第1章で述べたようにセイヨウオオマルハナバチが高温に弱いことが最も大きな原因であるが、これは第1章第2節で述べた巣箱の地下設置や巣箱の冷房装置の開発などにより、技術的には解決したといえる。しかし、高温期には、トマトの稔性花粉量が減少するために、花粉媒介昆虫による受粉では、着果率が低下する場合がある。これについては、第2章第1節で高温期にセイヨウオオマルハナバチを利用する場合、雨除け栽培の主力品種である‘桃太郎8’では1葯当たりの稔性花粉重量が $1.6 \mu\text{g}$ 以上になる日平均気温 28°C 以下の条件が必要なことを示

した。これは、キオビオオハリナシバチでも同様の結果となった（第4章第2節）。また、クロマルハナバチの高温期の利用についての報告例はないが、我が国の本州、四国、九州に分布する在来種である（片山，2007）ことを考慮すると、少なくともセイヨウオオマルハナバチと同等の高温対策で利用可能と推察できる。経済的に実用可能な方法で高温条件下の稔性花粉量減少を回避することは困難であるが、池田・忠内（1995）は高温条件下でのトマトの花粉発芽率に品種間差があることを示している。温暖化による農作物の被害が懸念される今日、より高温条件下で花粉媒介昆虫を利用するための品種の選定や育種が今後の課題である。

4. ナス栽培における花粉媒介昆虫の利用

現在、ナスの営利栽培で利用できる花粉媒介昆虫として商品化されている種は、セイヨウオオマルハナバチ、日本在来種のクロマルハナバチおよびセイヨウミツバチの3種である。これに加えて、第3章第1節でキオビオオハリナシバチについて検討し、セイヨウオオマルハナバチと同等の受粉効果があることを明らかにした。しかし、本種は大量増殖技術が未確立で商品化されていない。生産現場では、特定外来生物に指定されたセイヨウオオマルハナバチの代替花粉媒介昆虫として、セイヨウミツバチまたは在来種のクロマルハナバチのいずれかを選択しなければならない。クロマルハナバチの飼養は法規制されていないが、前述のように生態的リスクが懸念されている。一方、セイヨウミツバチは明治初期にヨーロッパから導入され、全国の野外で広く飼養されているにも関わらず、重要な天敵であるオオスズメバチ *Vespa mandarinia japonica* やミツバチヘギイタダニ *Varroa jacobsoni* が分布する日本本土では土着できない（小野，1996）ため、生態系への悪影響も小さいと考えられる。これらのことから、セイヨウオオマルハナバチに代わる花粉媒介昆虫として、セイヨウミツバチが最も好適と考えられる。

促成栽培ナスの主産県である高知県では、2005年に全栽培面積の83%で花粉媒介昆虫が利用され、多くの生産者が花粉媒介昆虫としてセイヨウミツバチを利用している（表43）。しかし、第3章第2節で述べたようにセイヨウミツバチを利用すると稔性花粉量の減少する冬期にナスの収量や果実外観が低下するため、冬期にはセイヨウオオマルハナバチとセイヨウミツバチの併用や、セイヨウオオマルハナバチへの切り替えが行われている。このため、セイヨウオオマルハナバチの

表42 セイヨウオオマルハナバチ、セイヨウミツバチおよびキオビオオハリナシバチの利用上の特徴

ポリネーター	品目	施設内 気温 ^z	稔性 花粉量 ^y	訪花活性 ^y	着果率 ^y	果実肥大 および外観 ^y	受粉への利用	
							周年利用のための温度条件	可否 ^x
セイヨウオオマルハナバチ	トマト	高温	—	±	—	—	施設内気温28℃未満	△
		低温	±	+	+	+		○
	ナス	高温	+	±	+	+	昼間の3時間高温管理と高温時の受粉	○
		低温	±	+	+	±		△
セイヨウミツバチ	トマト	高温	—	—	—	—		×
		低温	±	—	—	±		×
	ナス	高温	±	+	+	+	昼間の高温管理（施設の保温性向上）	○
		低温	—	±	±	—		△
キオビオオハリナシバチ	トマト	高温	—	—	—	—	施設内気温28℃未満	△
		低温	±	+	+	+		○
	ナス	高温	+	±	+	+	昼間の3時間高温管理と高温時の受粉	○
		低温	±	±	+	±		△

^z高温は日平均気温28～29℃，低温は日最低気温12～13℃を示す

^y+：良好，±：実用レベルあり，—：実用レベルなし

^x○：利用可能，△：条件を満たせば利用可能，×：利用不可能

表43 施設栽培ナス主産県の花粉媒介昆虫の利用状況と12～2月の日照時間

県名	全栽培 面積 (ha) ^z	花粉媒介昆虫 の利用面積 (ha) ^z	花粉媒介昆虫の利用面積率 (%) ^{zy}			12～2月の日照時間 ^x	
			全種合計	マルハナバチ	ミツバチ	平年値 (h)	測定地点
高知	359	298	83	18	65	541.0	安芸
愛知	98	72	73	44	29	488.0	岡崎
群馬	121	63	52	38	14	597.5	桐生
福岡	159	17	11	11	0	434.8	大牟田
熊本	189	12	6	4	2	408.6	熊本
岡山	52	1	2	2	0	443.4	岡山
全国	1500	525	35	15	20	—	—

^z農林水産省統計資料「園芸用ガラス室・ハウス等の設置状況（平成17年）」より抜粋

^y マルハナバチはセイヨウオオマルハナバチとクロマルハナバチを含み，ミツバチはセイヨウミツバチだけを示す

^x 「気象庁気象統計情報」より抜粋

導入コストが余分に必要であり，導入期間の判断も難しい。また，セイヨウオオマルハナバチが特定外来生物に指定されたため，たとえ冬期に限定した使用であっても，その使用許可を得るための手続きや施設からの飛び出し防止対策が必要となるなど，導入の手間やコストが増加する問題点がある。そこで，第5章で問題の少ないセイヨウミツバチの低温期の利用への道を開くに当たって生じる問題について検討し，昼間の施設内気温を高めると冬期の稔性花粉量の減少が抑制でき，収量および果実外観の低下が防止できることを明らかにした。昼間の施設内気温の上昇は，施設内へ透

入する日射エネルギー量によって主に決まることから，日照さえあれば冬期でも容易に気温は高まる。従って，冬期の日照時間が長い地域ほど，稔性花粉量の減少が抑制され，セイヨウミツバチの受粉により収量および果実外観を維持しやすい。促成栽培ナスの主産県の代表的産地に近い観測地点での12月から2月までの日照時間は，高知県安芸市が541.0時間，愛知県岡崎市が488.0時間，群馬県桐生市が597.5時間，岡山県岡山市が443.4時間，熊本県熊本市が408.6時間，福岡県大牟田市が434.8時間である（表43）。前述のように，群馬県に次いで日照時間の長い高知県でも，冬期には

稔性花粉量が減少して収量や果実外観が低下する。秋期から夏期までの施設栽培ナスにおけるセイヨウミツバチの利用面積率は、他県に先駆けて導入した高知県が65%と高く、愛知県が29%、群馬県が14%、福岡県が0%、熊本県が2%、岡山県が0%である(表43)。冬期の日照時間が高知県に比べて短い福岡県、熊本県および岡山県では、稔性花粉量の減少による収量や果実外観の低下が大きいと考えられ、これらの県でセイヨウミツバチはほとんど利用されていない。今後、これらの県でセイヨウミツバチを利用するには、第5章で示したように施設内の気温を積極的に高めることが効果的な対策となる。しかし、燃料費が高騰している現状では、第5章第6節で検討したような保温性の高いハウス被覆資材の活用などの方策が有効と考えられる。

本研究により、セイヨウオオマルハナバチに比較して受粉効率が劣るセイヨウミツバチをナスの稔性花粉量が減少する冬期に利用する技術を開発した。栽培期間の最も長い促成栽培においてセイヨウミツバチを利用する期間は9月から翌年の6月までの10か月間に及ぶ。今後、施設内の閉鎖的環境下でセイヨウミツバチを長期間利用するためのコロニーサイズの決定、適正な給餌頻度および給餌量の解明、簡便な給餌法の開発などが必要である。

5. トマトおよびナス栽培における花粉媒介昆虫利用の経済性

花粉媒介昆虫による受粉は、慣行の化学合成ホルモン剤である4-CPA溶液処理に代わる有望な着果技術であるが、トマトやナスの生産量や商品価値が特別に向上するわけではない。花粉媒介昆虫を利用して生産された生産物に対する安心なイメージによって、生産物が差別化され、付加価値が付いて販売単価が向上する場合もある(玖波井・松島, 2004)が、これは、花粉媒介昆虫利用の一般化に伴って消えていくものと考えべきであろう。従って、花粉媒介昆虫の導入は、必ずしも粗収入の増加に繋がらない。そのため、花粉媒介昆虫を導入しようとする、セイヨウオオマルハナバチやセイヨウミツバチの購入経費などが増加して農業所得は減少する。一方、岡(2006)はトマト栽培にセイヨウオオマルハナバチを利用した場合、時間当たり労働報酬とセイヨウオオマルハナバチ導入により削減した時間を乗じて求めた利益は、花粉媒介昆虫の導入にかかる経費を差し引いても、10 a当たりで夏秋トマトが51,000円、秋冬トマトが100,000円と算出している。また、玖波井・松島(2004)は施設栽培ナスにセ

イヨウオオマルハナバチと天敵を利用した場合、経営費は増加するが、省力化(全省力時間の97%がセイヨウオオマルハナバチの利用による人工着果作業の削減)によって減少し、総労働時間が慣行と等しくなるまで経営規模を拡大すると、22~26%の規模拡大が可能で、それによって、10a当たりの農業所得が808,000~956,000円増加すると試算している。これらの試算から、省力効果を規模拡大などで所得向上に反映させることで、花粉媒介昆虫利用による経済効果が高まると考えられる。第5章で明らかにしたように促成栽培ナスの低温期に花粉媒介昆虫を利用する場合、十分な量の稔性花粉を維持するためには慣行の夜間の加温に加えて、昼間3時間を最低気温25℃に加温する必要がある。第5章第4節の結果から、昼間3時間高温管理した場合の12月から2月までの加温機の稼働時間が91~95時間、10月から5月までの夜間の稼働時間が2,599時間となる。従って、12月から2月まで昼間3時間高温管理すると、加温機の稼働時間が最大で3.7%増加した。平成20年12月から2月までのA重油の1 L当たりの平均単価を89.7円(平成20年度農林水産省農林水産統計)、促成栽培の10 a当たりのA重油使用量を11,810 L(平成17年度岡山県経営指導指標)として試算すると、燃料費は1,059,357円で、昼間3時間の高温管理に要する燃料費の増加額は39,196円となる。これは、玖波井・松島(2004)の示した規模拡大による農業所得の増加分に比べて極僅かである。

6. トマトおよびナス栽培における花粉媒介昆虫利用の今後

トマトやナスの栽培において花粉媒介昆虫の利用が増加している理由の一つとして、着果処理の省力化があげられる。簡便な着果処理の省力化方法に単為結果性品種の利用がある。トマトやナスでは既に単為結果性品種が育成されており(菅原ら, 1995; 菅原ら, 2002; 松本・小松, 2007; 齊藤ら, 2007)、今後、単為結果性品種の利用が一般化する可能性がある。しかし、生産者の品種の選択には、市場価値や栽培特性が強く影響することから、既存の品種と同等以上の市場価値と栽培特性を有するものでなければ普及性は低い。現在の単為結果性品種は既存品種品種に比較し、改善を要する特性を残している(菅原ら, 2002; 齊藤ら, 2007)。

花粉媒介昆虫の導入を前提とした栽培では、非選択的な化学合成農薬の使用が制限されることから天敵昆虫も生存しやすい環境が創出され、IPMや有機農業と

の相性が良いことを指摘したい。これは、数量化して示すことの困難な項目ではあるが、重要視しなければならない。2006年12月に施行された「有機農業推進法」の第2条において、「有機農業とは、化学的に合成された肥料および農薬を使用しないことならびに遺伝子組換え技術を利用しないことを基本として、農業生産に由来する環境への負荷をできる限り低減した農業生産の方法を用いて行われる農業」と定義された。この有機農業の推進において、化学合成農薬の不使用という困難な課題を解決するためには、天敵昆虫の活用が不可欠である。今のところ、化学合成農薬を使用しない

でナスおよびトマトを栽培することは極めて困難であるが、花粉媒介昆虫を導入すると、ほとんどの生産者は花粉媒介昆虫に対して悪影響の少ない選択的殺虫剤を自発的に使用する。そして、花粉媒介昆虫に悪影響が少ない選択的殺虫剤は、多くの天敵昆虫にも悪影響が少ない（日本バイオリジカルコントロール協議会、2006）。このため、花粉媒介昆虫の利用は、IPM等の天敵昆虫を利用した減農薬栽培との相性が良く、生産現場における化学合成農薬の使用量の低減に、間接的ではあるが大きく貢献すると考えられる。

摘要

我が国の主要な果菜であるトマトやナスは施設内で栽培されることが多く、その場合には風や訪花昆虫による受粉が期待できず、開花時に化学合成された植物ホルモン剤を処理して着果を促進して生産されている。しかし、近年、食の安全・安心に対する消費者の関心の高まりに伴い、化学合成農薬の使用を削減するための新たな技術開発の必要性に迫られている。同時に生産者の高齢化や担い手不足から農作業の省力化に対するニーズも高い。

着果促進のために、施設栽培ではこれまで植物ホルモン剤が使用されてきたが、近年花粉媒介昆虫による受粉が注目されている。我が国の冬春期の促成栽培トマトでは、北ヨーロッパ原産のセイヨウオオマルハナバチ *Bombus terrestris* Linnaeus が導入され利用されている。しかし、寒地系の花粉媒介昆虫である本種を栽培期間の大半が高温期に当たる夏秋期のトマトやナス栽培で、そのまま利用することは困難であった。そこで、巣箱を地下に埋設することで巣箱内の温度を低下させる地下埋設法を考案し、高温期にセイヨウオオマルハナバチのコロニーを長期間維持することで、夏秋期の雨除け栽培トマトおよび半促成栽培ナスへの利用に道を開いた。さらに、高温期に稔性花粉量が減少するトマトでは、花粉生成量に及ぼす施設内温度の影響を解析し、夏期にセイヨウオオマルハナバチを利用できる時期や地域を判別できる回帰式を考案した。

ところが、導入された施設から逃亡し、野生化したセイヨウオオマルハナバチの生態系に及ぼす悪影響を懸念し、2006年から「特定外来生物」として飼養が規制された。そこで、本種に代わる花粉媒介昆虫として、明治初期に導入された後ほとんど土着化がみられないセイヨウミツバチ *Apis mellifera* Linne と熱帯原産で我が国本土で越冬できず土着化が困難と考えられるキオビオオハリナシバチ *Melipona quadrifasciata* Lepelletier の利用を検討した。セイヨウオオマルハナバチのような振動採粉ができないセイヨウミツバチの授粉能力は低く、作型に係わらずトマトでは利用困難であった。ナスでは低温期に稔性花粉量が減少するとセイヨウミツバチによる受粉効果が低下し、形状不良果が増加したが、稔性花粉量の十分な時期の施設ナスでは利用できた。キオビオオハリナシバチは振動採粉でき、セイヨウオオマルハナバチと同等の受粉効果があることを明らかにした。しかし、いずれの花粉媒介昆虫を利用しても、低温期に促成栽培ナスの稔性花粉量が減少すると受粉効果が低下した。そこで、少量の燃料消費でナ

スの稔性花粉量を効率的に増量できる昼間の高温管理法を提案し、実用的技術とした。さらに、低温期の利用が困難なセイヨウミツバチについて、保温性の高い空気膜ハウス内に放飼すると受粉効果が高まることを明らかにし、施設ナス栽培におけるセイヨウミツバチの周年利用に道を開いた。

主要な成果の概要は以下のとおりである。

1. セイヨウオオマルハナバチの利用

(1) 巣箱の高温対策

施設内に掘削した縦穴の地下60 cm以下に巣箱を設置すると、施設内の最高気温が37~38℃になっても、巣箱周囲の気温は30℃以下に維持できた。この縦穴内に設置した巣箱は高温期の7~8月であってもセイヨウオオマルハナバチの放飼適温である4~6月とほぼ同等になった。雨除け栽培のトマト（開花期間5~9月）およびナス（開花期間5~11月）では約2か月間利用可能であった。

(2) トマト

雨除け栽培（開花期間6~9月）のトマトでは、開花6~10日前の施設内の日平均気温とトマトの稔性花粉量に高い負の相関関係があり、両者の関係は回帰式 $y = -1.185x + 34.952$ ($r^2 = 0.52$, y : 1葯当たり稔性花粉重量, x : 開花6~10日前の施設内日平均気温) で示された。そして、開花6~10日前の施設内の日平均気温が28℃以下の時期や地域では、着果率が概ね60%以上あり、植物ホルモン剤の代わりにセイヨウオオマルハナバチの利用が可能であることを実証した。

(3) ナス

セイヨウオオマルハナバチを放飼した雨除け栽培（開花期間4~11月）のナスでは、植物ホルモン剤のパラクロロフェノキシ酢酸（商品名：トマトーン）処理したナス果実に比較して上物率が向上した。従来、植物ホルモン剤を処理せずに栽培されていた夏秋期の雨除け栽培に、セイヨウオオマルハナバチを導入すると収量および果実外観が極めて向上することを実証した。

2. セイヨウミツバチの利用

(1) トマト

セイヨウミツバチは訪花しないとされていた半促成栽培（開花期間3~8月）のトマトにセイヨウミツバチを放飼すると、セイヨウオオマルハナバチのように放飼当日に訪花することはなかったが、放飼1週間後から訪花を始め、無処理に比較してトマトの着果率は高

まり、種子数の増加が認められた。しかし、セイヨウミツバチでは着果率が低く、1果当たりの種子数が少ないため形状不良果率が高まり、果重も軽く、実用的な利用は困難であった。

(2) ナス

促成栽培（開花期間9～6月）のナスにおけるセイヨウミツバチによる受粉では、セイヨウオオマルハナバチによる受粉に比較して収量はほぼ同等であったが、低温期（12～2月）に形状不良果率が高まった。セイヨウミツバチでセイヨウオオマルハナバチと同等の外観の果実を収穫するための必要最小限の稔性花粉重量は1葯当たり0.5～0.6 mgであった。この稔性花粉の生成は気温の影響を強く受け、最低気温18℃以上でナスを栽培する必要があった。

3. キオビオオハリナシバチの利用

(1) トマト

抑制栽培（開花期間9～3月）および雨除け栽培（開花期間5～10月）のトマトにキオビオオハリナシバチを放飼すると、セイヨウオオマルハナバチに比べて採粉効率および着果率は優れ、収量および果実外観は同等であった。しかし、トマトの花粉量が減少する高温期（7～9月）には、セイヨウオオマルハナバチに比較して訪花率が低下したことから受粉効果が劣った。

(2) ナス

促成栽培（開花期間9～6月）のナスにキオビオオハリナシバチを放飼すると、受粉効率、収量および果実外観はセイヨウオオマルハナバチと同程度に良好で、低温期であっても利用可能と考えられた。

4. 低温期のナス栽培における花粉媒介昆虫の利用技術

(1) 昼間の高温管理による稔性花粉重量増加効果

暖房費が少なくすむ昼間に加温して花粉の発芽適温である25℃以上を維持してナスを栽培すると、昼間に高温管理しない慣行に比較して稔性花粉重量は増加した。しかし、稔性花粉重量は、高温管理3時間（11～14時）と9時間（8～17時）の間で有意差がなかった。形状不良果率は9時間高温管理が最も低く、次いで3時間高温管理で、昼間の高温管理をしない場合が最も高かった。

(2) 花粉発芽に及ぼす温度の影響

寒天培地上にナス花粉を置床し、花粉の発芽と花粉管伸長に及ぼす温度の影響を検討した。置床直後に発芽適温の25℃に1時間置いた後15℃の低温に移しても

発芽率の低下や花粉管伸長の遅延は認められなかった。逆に、置床直後に15℃の低温に1時間置いた後、25℃に移しても発芽率は上昇しなかった。これらのことから、受粉後1時間以内の温度が花粉の発芽率や発芽管伸長に大きく影響することが示唆された。

(3) 受粉時の気温が果実外観に及ぼす影響

昼間に25℃の高温管理中の時間帯に受粉した果実は、高温管理しない時間帯に受粉した果実に比較して、種子数および正常果収量は増加し、果実外観も向上した。しかし、この高温管理効果は昼間の3時間（11～14時）と9時間（8～17時）で有意差がなかった。また、1時間（11～12時）だけ25℃以上に高温管理しても高温管理中に受粉した果実は、高温管理しない慣行栽培に比べて種子数が増加し、形状不良果率は低下し、果実外観の向上が認められた。

(4) 保温性を高めた施設におけるセイヨウミツバチの受粉効果

セイヨウミツバチを低温期（12～2月）のナスで利用するには、ワーカーが訪花する昼間の気温をできるだけ高く維持する必要がある。これには空気膜ハウスを利用すると、慣行以下の加温経費でセイヨウミツバチの利用が可能であった。

引用文献

- 天野和宏（2003）メキシコにおけるハリナシミツバチ類の遺伝資源としての現状と利用に関する調査。動探報, 13: 1-34.
- 浅田真一（1998）マルハナバチの農業への利用。昆虫と自然, 33 (6): 30-33.
- Banda, H. J. and R. J. Paxton（1991）Pollination of plastichouse tomatoes by bees. *Acta Hort. (ISHS)*, 288: 194-198.
- Cauch, O., J. J. G. Quezada-Euan, J. O. Macias-Macias, V. Reyes-Oregel, S. Medina-Peralta and V. Parra-Tabla（2004）Behavior and pollination efficiency of *Nannotrigona perilampoides* (Hymenoptera: Meliponini) on greenhouse tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) in subtropical Mexico. *Horticultural Entomology*, 97: 475-481.
- Del Sarto, M.C. L., R. C. Peruquetti and L. A. O. Campos（2005）Evaluation of the neotropical stingless bee *Melipona quadrifasciata* (Hymenoptera: Apidae) as pollinator of greenhouse tomatoes. *J. Economic Entomology*, 98: 261-266.
- Frazier, W. A. and J. L. Bowers.（1947）A report on

- studies of tomato fruit cracking in Maryland. *Proc. Soc. Hort. Sci.*, 49: 241-255.
- 藤井健雄・坂本光男 (1944a) 茄の落花に及ぼす低温の影響について. 農及園, 19: 825-826.
- 藤井健雄・坂本光男 (1944b) 茄の落花に及ぼす高温の影響について. 農及園, 19: 985-986.
- 藤井健雄・鈴木 弘 (1943) 蕃茄の花の発育に就て. 園学雑, 14: 26-36.
- 藤下典之 (1981) 花粉の発芽. 園芸学実験・実習, 大阪府立大学農学部園芸学教室編, 養賢堂, 東京, pp. 78-82.
- 五箇公一 (2002) 輸入昆虫が投げかけた問題. 昆虫と自然, 37(3): 8-11.
- 橋本和泉・前田幸二 (1998) 寒天培地上におけるナスの花の発芽に及ぼす温度の影響. 園学中四国支部要旨, 37: 31.
- 畠中 誠 (1993) タキイ交配トマト「桃太郎8」その特性と栽培の要点. 園芸新知識野菜号, 172: 2-4.
- Heard, T. A. (1999) The role of stingless bees in crop pollination. *Annu. Rev. Entomol.*, 44: 183-206.
- 飛川光治 (2004) セイヨウミツバチによる受粉が促成栽培ナスの収量および果実形状に及ぼす影響. 園学研, 3: 175-178.
- 飛川光治 (2007) ナスの促成栽培における日中加温が冬期の稔性花粉重量に及ぼす影響. 園学研, 6: 247-250.
- 飛川光治 (2008a) ナスの花粉発芽に及ぼす培養温度ならびに促成栽培における種子数, 収量および果実外観に及ぼす日中加温の受粉の影響. 園学研, 7: 381-385.
- 飛川光治 (2008b) 空気膜ハウスがナスの促成栽培におけるセイヨウミツバチの受粉効果に及ぼす影響. 岡山農試研報, 26: 31-35.
- 飛川光治・石倉 聡 (2008) 夏秋トマト雨除け栽培における花粉稔性からみたセイヨウオオマルハナバチの利用可能温度. 岡山農試研報, 26: 27-29.
- 飛川光治・宮永龍一 (2006) ナスの促成栽培におけるキオビオオハリナシバチバチの受粉効果. 園学研, 5: 149-152.
- 飛川光治・宮永龍一 (2007) トマトの抑制栽培におけるキオビオオハリナシバチバチの受粉効果. 園学研, 6: 435-439.
- Hikawa, M and R. Miyanaga (2009) Effects of pollination by *Melipona quadrifasciata* (Hymenoptera: Apidae) on tomatoes in protected culture. *Appl. Entomol. Zool.*, 44: 301-307.
- 平野耕治・稲明寺智成 (2003) トマトハウスでのオオハリナシバチとマルハナバチの花粉媒介比較実験. 第47回応動昆大会講演要旨, 55.
- 池田二三高 (1995) 産業としての天敵昆虫と花粉媒介昆虫の利用. 植物防疫, 49: 462-465.
- 池田二三高・忠内雄次 (1992) わが国へのツチマルハナバチの導入経緯と果菜類の花粉媒介昆虫としての実用性. 農及園, 67: 1213-1216.
- 池田二三高・忠内雄次 (1995) 果菜類の交配におけるマルハナバチの利用. ミツバチ科学, 16: 49-56.
- 今津 正・矢吹万寿・織田弥三郎 (1967) 炭酸ガス環境に関する研究 (第2報) CO₂濃度がナスの生育, 開花および結実におよぼす影響. 園学雑, 36: 275-280.
- 片山栄助 (2007) マルハナバチ. 北海道大学出版会, 東京, 189p.
- 加藤 真 (1993) セイヨウオオマルハナバチの導入による日本の送粉共生系への影響. ミツバチ科学, 14: 110-114.
- 小出哲哉 (1997) 着果促進. 農業技術大系野菜編 2, 農文協, 東京, pp. 459-462.
- 小出哲哉・山田佳廣・矢部和則・山下文秋 (2008) 温室におけるマルハナバチ逃亡防止のためのネット展張技術. 応動昆, 52: 19-26.
- 玖波井邦昭・松島貴則 (2004) 花粉媒介昆虫と天敵を利用した施設ナス栽培体系の経営的評価. 高知農技セ研報, 13: 1-12.
- 国武陽子・五箇公一 (2006) クロマルハナバチの商品化—外来生物法と国内外来種問題について. 昆虫と自然, 41 (5): 37-40.
- 河野達郎・杉野多万司 (1958) ニカメイチュウ被害茎密度の推定について. 応動昆, 2: 184-187.
- 串間秀敏・白木己歳・江藤忠育 (1999) ナスの促成栽培におけるマルハナバチの利用. 九農研, 61: 171.
- 前田幸二 (2001) 着果管理. 農業技術大系野菜編 5, 農文協, 東京, pp. 282の2-3.
- 前田幸二・橋本和泉 (1997) 促成ナス「竜馬」の着果, 収量, 品質に及ぼすマルハナバチによる受粉の影響. 園学雑, 66 (別2): 362-363.
- 前田泰生・手塚俊行・灘野宏行・鈴木謙治 (1992) ブラジル産カベハリナシバチのイチゴのポリネータとしての利用. ミツバチ科学, 13: 71-80.
- 松本満夫・小松秀雄 (2007) 単為結果性するナス"はつゆめ"の育成. 今月の農業, 51 (6): 22-25.
- 松浦 誠 (1993) マルハナバチによるトマトの花粉媒

- 介. 植物防疫, 47: 173-176.
- 松浦 誠 (1998) 花粉媒介昆虫の現状と問題点. 蚕糸昆虫研資料, 25: 67-78.
- Michener, C. D. (2000) *The Bees of the world*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore and London, 962pp.
- 三原順一・西本 太・青木和年 (1995) マルハナバチ利用によるナス (促成) 栽培の省力化技術. 九農研, 57: 182.
- 光畑雅宏・和田哲夫 (2005) 作物受粉における在来種マルハナバチの利用の可能性と課題. 植物防疫, 57: 305-309.
- 宮本雅章・小野正人・佐々木正己・阿部晴夫・剣持伊佐男 (2006) ミツバチを利用した半促成ナスの着果促進技術体系の開発: I. セイヨウミツバチの花粉媒介の効果. 応動昆, 50: 297-304.
- 宮本雅章・小野正人・佐々木正己・剣持伊佐男 (2007) ミツバチを利用した半促成ナスの着果促進技術体系の開発: II. 栽培条件が訪花活動に及ぼす影響. 応動昆, 51: 265-272.
- 森田克彦 (2002) 高知県における加温ハウスナス類の花粉媒介昆虫利用事例. ミツバチ科学, 23: 161-167.
- 永井一哉 (1993) ミナミキイロアザミウマの個体群の総合的管理に関する研究. 岡山農試臨報, 82: 1-55.
- 日本バイオロジカルコントロール協議会 (2006) 天敵に関する農薬の影響表. バイオコントロール, 10 (1): 巻末p. 15
- 農林水産省農産園芸局野菜振興課 (2000) 施設野菜におけるマルハナバチの利用状況. 園芸用ガラス室・ハウス等の設置状況, 日本施設園芸協会, 東京, pp. 163-164.
- 農林水産省生産局野菜課 (2005) 施設野菜におけるミツバチ及びマルハナバチの利用状況. 園芸用ガラス室・ハウス等の設置状況, 日本施設園芸協会, 東京, 207 p.
- 岡 敏弘 (2006) 環境経済学. 養賢堂, 東京, 316p.
- 岡田一次 (1975) ミツバチの科学. 玉川大学出版部, 東京, 182pp.
- 岡山県農林水産部 (1986) なす. 岡山県青果物出荷規格, 33p.
- 岡山県農林水産部 (2006) 作物別標準指導指標トマト雨よけ. 平成17年度農業経営指導指標, pp. 154-155.
- 小野正人 (1994) マルハナバチの利用—その現状と将来—. ミツバチ科学, 15: 107-114.
- 小野正人 (1996) オオスズメバチの採餌戦略に対するニホンミツバチの防衛戦略. ミツバチ科学, 17: 27-30.
- 小野正人・和田哲夫 (1996) マルハナバチの世界. 日本植物防疫協会, 東京, 132pp.
- Roubik, D. W. (1989) *Ecology and natural history of tropical bees*. Cambridge University Press, New York., 514p.
- 斉藤 隆 (1974a) 花芽発育の生理, 生態. 農業技術大系野菜編 5, 農文協, 東京, pp. 77-94.
- 斉藤 隆 (1974b) 開花, 結実の生理, 生態. 農業技術大系野菜編 5, 農文協, 東京, pp. 83-99.
- 斉藤 隆・伊東秀夫 (1973) ナスの開花・結実に関する研究 (第8報). 園学雑, 42: 155-162.
- 齊藤猛雄・吉田建実・門馬信二・松永 啓・佐藤隆徳・斎藤 新・山田朋宏 (2007) 単為結果性ナス品種‘あのみり’の育成経過とその特性. 野菜茶業研究所研究報告, 6: 1-11.
- 島地英夫 (2007) 空気膜ハウスを利用した省エネ型栽培施設. 農機誌, 69 (1): 18-21.
- 下鳥大作 (1992) イチゴ栽培を支えるミツバチ. ミツバチのはなし (酒井哲夫編), 技報堂出版, 東京, pp. 119-124.
- Slaa, E. J., L. A. Sanchez, M. Sandi, and W. Salazar (2000) A scientific note on the use of stingless bees for commercial pollination in enclosure. *Apidologie*, 31: 141-142.
- 宗月明久 (1999) マルハナバチのナス栽培での利活用. 農耕と園芸, 54 (3): 111-113.
- 菅原真治 (1992) 施設栽培トマトの省力技術としてのマルハナバチによる受粉. 施設園芸, 6: 54-572.
- 菅原真治 (1997) 着果促進技術. 農業技術大系野菜編 2, 農文協, 東京, pp. 457-458.
- 菅原真治・坂森正博・青柳光昭 (1995) 温室トマトへの単為結果性因子の導入 (第3報) 単為結果性トマト新品種「ラクーナファースト」の育成経過と特性. 愛知農総試研報, 27: 167-173.
- 菅原真治・榎本真也・大藪哲也・矢部和則・野口博正 (2002) 完熟収穫型単為結果性トマト品種‘ルネッサンス’の育成経過と特性. 愛知農総試研報, 34: 37-42.
- 田中 寛・上田昌弘・柴尾 学 (1998) マルハナバチを導入したハウストマトの害虫管理. 植物防疫, 52: 19-22.
- 寺林 敏・矢澤 進 (2003) 可食部位の形態と器官, 組織の発達. 野菜新書, 朝倉書店, 東京, pp. 51-75.
- スィーレイ, T. D. (1985) [大谷 剛 訳, 1989] ミ

- ツバチの生態学. 文一総合出版, 東京, 256p.
- 鷲谷いずみ (1998) 保全生態学からみたセイヨウオオマルハナバチの侵入問題. 日本生態学会誌, 48: 73-78.
- Whittington, R., M. L. Winston, C. Tucker and A. L. Parachnowitsch (2004) Plant-species identity of pollen collected by bumblebees placed in greenhouses for tomato pollination. *Can. J. Plant Sci.*, 84: 599-602.
- 山崎肯哉・鈴木芳夫・篠原 温 (1976) そ菜の養液栽培 (水耕) に関する研究, 特に培養液管理とみかけの吸収濃度 (n/w) について. 東教大農紀要, 22: 53-100.
- 米田昌浩・土田浩治・五箇公一 (2008) 商品マルハナバチの生態リスクと特定外来生物法. 応動昆, 52: 47-62.
- 米田昌浩・横山 潤・土田浩治・大崎哲也・糸屋新一郎・五箇公一 (2007) 北海道平取町におけるネット展帳を用いたセイヨウオオマルハナバチ *Bombus terrestris* の逃亡防止策の検討. 応動昆, 51: 39-44.
- 吉田千恵 (2008) 空気膜二重構造によるパイプハウスの保温性向上. 農耕と園芸, 6 (1): 104-106.
- 吉田建実 (2000) 台木と利用法. 農業技術大系野菜編 5, 農文協, 東京, pp. 基205-206.

Studies on Use of Pollinators for Tomatoes and Eggplants in Protected Culture

Mitsuharu Hikawa

Summary

Artificial treatment for fruit set is necessary for the commercial production of tomatoes and eggplants in greenhouses. A European bumblebee species *Bombus terrestris* has generally been used as a pollinator of greenhouse tomatoes in Japan. However, because the exotic bumblebee might disturb natural ecosystems should it be inadvertently introduced, its use in agricultural production has been restricted since the establishment of the Invasive Alien Species Act in 2006. A honeybee, *Apis mellifera* was not established though it was introduced at the Meiji era. A stingless bee, *Melipona quadrifasciata*, individuals originating from tropical and subtropical regions of South America might not establish populations in Japan because most do not have sufficient ability to thermoregulate their nest and can not overwinter in the temperate zone. Therefore, their use as alternative pollinators for the production of tomatoes and eggplants in greenhouses were examined. As the result, *A. mellifera*, can not exhibit buzz-pollinating behavior that was not effective for the pollination of tomatoes with united poricidal anthers. But *A. mellifera* was effective for the pollination of eggplants when the amount of fertile pollen was sufficient. *M. quadrifasciata* exhibits buzz-pollinating behavior that was effective for the pollination of tomatoes and eggplants. However, when the amount of fertile pollen of eggplant reduced in winter even if which pollinator was used, the pollination efficiency was insufficient. Thus, the effects of daytime heating on the amount of fertile pollen of the eggplant were examined. As the result, it was shown that daytime heating was the practical method as able to increase the fertile pollen efficiently by a small amount of fuel consumption. In addition, it was shown that the pollinating by *A. mellifera* in greenhouses equipped with an air inflated membrane structure was effective. And the possibility for the year-round using of *A. mellifera* in the forcing culture eggplants was shown.

The main results are as follows.

1. The use of *B. terrestris*

(1) Method of setting up hive in summer

Even if the highest temperature in greenhouse became 37-38°C, the temperature of the hive surroundings could be

maintained to less than 30°C by setting up the hive in less than 60cm of the pit that had been dug in the underground. As the result, it was shown that the hive could be used for about two months on tomatoes and eggplants cultivation in summer.

(2) Tomatoes

The correlations of the weight of fertile tomato pollen with an average daily temperature are higher than those of maximum and minimum temperatures. Also, the highest negative correlation between fertile tomato pollen weight and average daily temperature occurs during the 5-day period from the 10th to the 6th day before flowering in the summer season. The relation was as follows: $y = -1.185x + 34.952$ ($r^2 = 0.52$, y : weight of the fertile pollen per anther, x : average daily temperature occurs during the 5-day period). And, *B. terrestris* could set tomato fruits at more than 60% under the average daily temperature of 28°C.

(3) Eggplants

The quality of eggplant fruits set by artificial treatment was higher for *B. terrestris* compared with the pollination by 4-chlorophenoxyacetic acid in rain protected culture. When *B. terrestris* was introduced into rain protected culture in autumn and summer, the the yields and fruit quality of eggplants were improved extremely.

2. The use of *A. mellifera*

(1) Tomatoes

The rate of fruit set and the seed number of tomato were increased for *A. mellifera* compared without other pollination in protected culture. But the rate of fruit set, the seed number and the weight of tomato fruits by the pollination of *A. mellifera* were much lower than those of the pollination of *B. terrestris*. Therefore, *A. mellifera* could not use as a pollinator of tomatoes

(2) Eggplants

The effects of pollination by *A. mellifera* on yield and quality of eggplants were examined in forcing cultures controlled at the lowest temperature of 15°C. The rate of unmarketable fruits pollinated by *A. mellifera* was lower than that of *B. terrestris* though the yields of both were equal. When fertile pollen weights per anther were increased 0.6mg or more, the rate of unmarketable fruits pollinated by *A. mellifera* became equal with that of *B. terrestris*. The fertile pollen weights of the eggplants cultivated in greenhouses where controlled at the lowest temperature at 18°C were increased not less than 0.6 mg per anther.

3. The use of *M. quadrifasciata*

(1) Tomatoes

To evaluate the pollination efficiency of *M. quadrifasciata* were examined on tomatoes cultivated in protected culture (the flowering period from May to March). We compared differences in the rates of foraged flowers, pollen weights foraged from anthers, rates of fruit set of tomatoes, seed number of tomato fruits and yields of tomato fruit weight between *M. quadrifasciata* and the bumblebee, *B. terrestris*. When the amount of tomato pollen was sufficient, there were no differences in pollination efficiency between *M. quadrifasciata* and *B. terrestris*; however, the rates of foraged flowers, the rate of fruit set and the yields were significantly reduced in *M. quadrifasciata* compared with *B. terrestris* when fertile tomato pollen decreased markedly during the hottest period in summer. These results indicate that *M. quadrifasciata* can be used as a suitable pollinator of tomatoes if sufficient amounts of fertile pollen are provided.

(2) Eggplants

Pollination efficiencies of *M. quadrifasciata* and *B. terrestris* on eggplants of forcing culture (the flowering period from September to June) were evaluated. Both of *M. quadrifasciata* and *B. terrestris* did not have a significant difference for quantity and quality of harvested fruits. It was concluded that the use of *M. quadrifasciata* as a pollinator of eggplants for forcing culture could be effectively used as substitution of *B. terrestris*.

4. The use of pollinator for eggplants during low temperature seasons

(1) Effects of daytime heating on production of fertile pollen

Fertile pollen weights of eggplants cultivated in greenhouses heated to above 25°C during daytimes in winter increased, and, as a result, the yields of normal fruits increased. The heating (above 25°C) of three hours around noon (11:00AM to 2:00PM) was almost equal to the heating effects in daytime (9:00AM to 5:00PM).

(2) Effects of temperature on germination of pollen in ager medium

Incubation at 25°C above one hour effectively promoted the pollen germination rate and the pollen tube elongation on agar medium.

(3) Improvements of the yield and the quality of fruits by daytime heating

The pollination efficiencies used by *B. terrestris* were improved by the temperature in greenhouse which kept at above 25°C during 3 h (11:00AM to 2:00PM) within daytime in winter. Under this temperature, the yield and the quality of fruits were satisfactory compared with the conventional practice by the aqueous solution of 4-CPA.

(4) Pollination efficiencies of *A. mellifera* in greenhouses equipped with an air inflated membrane structure

For the use of *A. mellifera* as a pollinator from late autumn to early spring, it is necessary to rise the temperature in greenhouses as much as possible. Recently, a double vinyl film was developed to improve heat insulation. The greenhouses equipped such double vinyl film can be used, *A. mellifera* will be able to be used for the pollination of the forcing culture all the year round.