

Technical Bulletin
of the Shizuoka Research Institute of Agriculture and Forestry
No.17 March 2025

静岡県農林技術研究所特別報告

第 17 号

令和 7 年 3 月

果樹の総合的病害虫管理における広食性カブリダニの捕食特性と
害虫防除効率との関係

土田 祐大

Relationships Between Predatory Characteristics and Biocontrol
Efficiency of Generalist Phytoseiid Mites in Integrated Pest
Management of Fruit Tree

Yuta Tsuchida

静岡県農林技術研究所

静岡県磐田市

SHIZUOKA RESEARCH INSTITUTE OF AGRICULTURE AND FORESTRY
IWATA-SHI, SHIZUOKA-KEN, JAPAN

果樹の総合的病害虫管理における
広食性カブリダニの捕食特性と害虫防除効率との関係*

Relationships Between Predatory Characteristics and Biocontrol
Efficiency of Generalist Phytoseiid Mites in Integrated Pest
Management of Fruit Tree

土田 祐大

Yuta Tsuchida

*岐阜大学大学院連合農学研究科博士学位審査論文 2022 年（令和 4 年）

目 次

第 1 章 緒言	1
第 2 章 カンキツ園における広食性カブリダニによるミカンサビダニの生物的防除	4
第 1 節 広食性カブリダニのミカンサビダニに対する捕食能力	5
第 2 節 広食性カブリダニへの代替餌としての花粉提供がミカンサビダニの生物的防除に及ぼす影響	6
第 3 節 経済栽培カンキツ園におけるコウズケカブリダニによるミカンサビダニの生物的防除	8
第 4 節 考察	11
第 3 章 ニホンナシ園における広食性カブリダニによるニセナシサビダニおよびカンザワハダニの生物的防除	22
第 1 節 静岡県内のニホンナシ園に発生するカブリダニ種の解明	23
第 2 節 ニホンナシにおける広食性カブリダニによるハダニ類発生抑制効果	23
第 3 節 経済栽培ニホンナシ園におけるコウズケカブリダニによるニセナシサビダニおよびカンザワハダニの生物的防除	25
第 4 節 考察	27
第 4 章 高品質な代替餌の存在下における 2 種広食性カブリダニのギルド内捕食および共食いがミカンサビダニの生物的防除に及ぼす影響	42
第 5 章 総合考察	50
摘 要	58
謝 辞	60
引用文献	61
Summary	75

第1章 緒言

化学合成農薬（以下、化学農薬）を主体とした病害虫防除は環境への影響や害虫の薬剤抵抗性の発達が懸念されるため、化学農薬の使用を削減可能にする総合的病害虫管理（integrated pest management: IPM）の重要性は以前にも増して高くなっている。我が国のIPMの取り組みは、1950年代から1980年代までは病害虫の経済的被害許容水準の設定と発生予察が中心であった（中筋, 1997; 宮井, 2005）。しかし、1990年代以降は、環境の保全や食品の安全性、害虫の薬剤抵抗性発達リスク管理などが重視されるようになり（中筋, 1997）、化学農薬に替わる個別防除技術の実用化が進んだ（宮井, 2005）。また、1980年代以降は昆虫成長制御剤をはじめとした、殺虫スペクトルの狭い化学農薬である選択性薬剤の開発も盛んに行われた（中村, 1998）。以上のような技術革新により、害虫防除と天敵の保護の両立が可能になったことから、現在では多くの農作物で天敵を利用した生物防除を基幹技術とするIPMが構築されている（農山漁村文化協会, 2016; 草間・山中, 2020）。

果樹園やその周辺植生には害虫であるフシダニ類やハダニ類の密度抑制に有効な捕食性昆虫やカブリダニ類などの土着天敵が多く生息する（森, 1964; 浜村ら, 1984; 下田・芦原, 1996; Kishimoto, 2002 など）。一方、我が国の果樹栽培では主に生鮮用の果実が国内外に向けて生産されるため、果実に被害を及ぼす主要病害虫や輸出検疫上問題となる病害虫を対象に、殺虫スペクトルの広い化学農薬である非選択性薬剤が頻繁に使用される傾向があった（伊澤, 1990; 大政, 1990; 多々良, 1992; Kishimoto, 2002）。土着天敵は非選択性薬剤の影響を受けやすい（森, 1964; 行徳・柏尾, 1990; 大西ら, 2003; 増井, 2010; 岸本ら, 2018, 2020 など）ため、主要病害虫を対象とした防除により土着天敵が排除され、その結果、二次害虫（Dutcher, 2007; Gross and Rosenheim, 2011）としてハダニ類が多発することが知られている（Kishimoto, 2002; 増井・片山, 2021）。1990年代以前の果樹園では、ハダニ類を防除するため殺ダニ剤が年間3回から4回散布されていた（中垣, 1968; 鈴木, 2010; 増井, 2011）。一方、この頃、薬剤抵抗性の発達によるハダニ類のリサージェンス（resurgence: Ripper, 1956）が各地で報告された（井上ら, 1986; Furuhashi, 1990; 伊澤, 2000）ため、化学農薬のみに頼らない本害虫の防除

方法が求められていた。カンキツ類では、1980年に中国からヤノネカイガラムシ *Unaspis yanonensis* (Kuwana)の有力な寄生蜂であるヤノネキイロコバチ *Aphytis yanonensis* DeBach et Rosen とヤノネツヤコバチ *Coccobius fulvus* (Compere et Annecke)の2種が発見・導入され（西野・高木, 1981）、その後、静岡県では1989年度まで両種が増殖配布された（古橋・西野, 1994）。この伝統的生物防除によりヤノネカイガラムシの寄生密度は大幅に低下した（Furuhashi and Nishino, 1983）ことから、1990年以降は本害虫を対象とした有機リン系殺虫剤の散布頻度が低下した（増井ら, 2018）。また、この頃、チャノキイロアザミウマ *Scirtothrips dorsalis* Hood を対象とした防除薬剤が、合成ピレスロイド系殺虫剤から一部の天敵に影響の小さいネオニコチノイド系殺虫剤へと移行した（土屋, 2005b）。ニホンナシ *Pyrus pyrifolia* (Burm. f.) Nakai var. *culta* (Makino) Nakai では、1990年代後半に複合交信かく乱剤が農薬登録されたことから、それまでシンクイムシ類やハマキムシ類を対象に年間8回から10回散布されていた化学農薬を大幅に削減することが可能となった（伊澤ら, 2000; 荒川・岡崎, 2002）。このような主要害虫に対する化学農薬の変遷により、果樹園内外に生息する天敵が保護される環境が整ったことで、多くの樹種でカブリダニ類を主体とした土着天敵によるハダニ類の防除効果が示された（伊澤ら, 2000; 荒川・岡崎, 2002; 大西ら, 2003; 土屋, 2005a）。

カブリダニ類は世界中の多様な農業生態系に生息しており、フシダニ類、ハダニ類、コナジラミ類、およびアザミウマ類といった微小害虫の生物防除に利用されている非常に有用な分類群である（天野, 1999; McMurtry et al., 2013）。カブリダニ類はその食性に基づき、*Tetranychus* 属ハダニの狭食性捕食者である Type I、ハダニ科ハダニの狭食性捕食者である Type II、ハダニ類以外の微小害虫や花粉等も摂食する広食性捕食者である Type III、および花粉の狭食性摂食者であり広食性捕食者でもある Type IV の4つのカテゴリーに大きく区分され（McMurtry and Croft, 1997; McMurtry et al., 2013）、防除対象となる害虫種によって各タイプのカブリダニ種が使い分けられている。例えば、施設園芸作物では、不規則立体網（Saito, 1985; 江原・真梶, 1996;

刑部ら, 2007) を形成するナミハダニ *Tetranychus urticae* Koch やカンザワハダニ *Tetranychus kanzawai* Kishida の防除に Type I の *Phytoseiulus* 属カブリダニが (McMurtry, 1982; van Lenteren and Woets, 1988; 森ら, 1993), コナジラミ類やアザミウマ類の防除に Type III の *Amblyseius* 属カブリダニが (Gillespie, 1989; Messelink et al., 2008; Calvo et al., 2011), それぞれ生物的防除資材として利用されている。また, 果樹では, 立体的な網を形成しないミカンハダニ *Panonychus citri* (McGregor) やリンゴハダニ *Panonychus ulmi* (Koch) の防除に Type II の *Neoseiulus* 属カブリダニが (Kishimoto, 2002; Katayama et al., 2006; 舟山, 2010), ハダニ類やフシダニ類, アザミウマ類といった複数種の害虫の防除に Type IV の *Euseius* 属カブリダニが (Tanigoshi et al., 1985; Smith and Papacek, 1991; Grafton-Cardwell and Ouyang, 1995), それぞれ土着天敵として保護利用されている。

我が国の果樹園においても, Type II から IV に区分される在来のカブリダニ類が複数種生息しているが, 害虫の防除に利用されているのは主に Type II のミヤコカブリダニ *Neoseiulus californicus* (McGregor) である。ミヤコカブリダニはハダニ類を専門的に捕食し, かつ多くの化学農薬に対してあまり影響を受けない (片山ら, 2012) ことから, 慣行防除園でも本天敵によるハダニ類の防除効果が確認されている (Amano, 2001; Kishimoto, 2002; Katayama et al., 2006)。静岡県のカンキツ園やニホンナシ園においても, ミヤコカブリダニ, Type III のニセラーゴカブリダニ *Amblyseius eharai* Amitai et Swirski, および Type IV のコウズケカブリダニ *Euseius sojaensis* (Ehara) の3種が主に発生する。前述したように, 静岡県のカンキツ園では1990年代までは殺ダニ剤を多数回散布することによりミカンハダニを防除していたが, 2000年代にはミヤコカブリダニを主体とした土着天敵の保護利用による IPM が構築され, 以降は殺ダニ剤による防除回数が半減した (増井ら, 2018)。ミヤコカブリダニはハダニ類の密度上昇と同時にしくはやや遅れて発生する (Kishimoto, 2002; Katayama et al., 2006) ため, 被害許容水準の低い落葉果樹では, 製剤化された本天敵の放飼増強法が検討されている (農研機構, 2021)。一方, ニセラーゴカブリダニやコウズケカブリダニは多くの化学農薬の影響を受けやすいため, 慣行防除園では両種はほとんど発生しない (Kishimoto, 2002;

Katayama et al., 2006)。そのため, これら広食性のカブリダニはハダニ類に加えて様々な微小害虫に対する防除効果が期待されている (Kondo and Hiramatsu, 1999b; Kishimoto, 2002; Shibao et al., 2004; 増井ら, 2018) にもかかわらず, 経済栽培園では積極的な利用には至っていない。

IPM の実践により主要害虫に対する化学農薬の散布回数を削減できる一方で, これまで同時防除されていた害虫の被害が顕在化するという問題がある (井村, 2013; Messelink, 2014; 柿元, 2020; 長坂ら, 2020)。我が国の果樹では, このような潜在害虫の代表的な種として, 果実被害や早期落葉を引き起こすフシダニ類が挙げられる。カンキツ類ではミカンサビダニ *Aculops pelekassi* (Keifer) の薬剤抵抗性の発達 (渠ら, 1997) が, ニホンナシではニセナシサビダニ *Eriophyes chibaensis* Kadono によるウイルスの媒介 (Kubota et al., 2021) が原因で全国的に被害が拡大している。前述したように, ハダニ類に対しては土着天敵を保護利用した IPM が構築され, 殺ダニ剤の使用頻度が大幅に低下した。その一方で, 殺ダニ剤によりハダニ類と同時に防除されていたフシダニ類が, IPM を実践することで多発するようになった。ハダニ類の狭食性捕食者であるミヤコカブリダニはフシダニ類に対する防除効果が期待できないため, フシダニ類が多発した場合, 生産者は年間2回程度の殺ダニ剤を追加散布する必要がある (伊澤, 2000; Ashihara et al., 2004)。しかし, フシダニ類に効果の高い薬剤は土着天敵に対する影響が大きいいため, 本害虫を化学農薬により防除するとミヤコカブリダニが排除され, その結果, ハダニ類のリサージェンスを引き起こす可能性がある (土田・増井, 2018)。このように, フシダニ類の多発は殺ダニ剤の使用回数を再び増加させることから, 土着天敵が持つ害虫防除効果を妨げるのみならず, 害虫の薬剤抵抗性の発達リスクを上昇させる要因となっている。

潜在害虫を対象とした化学的防除により引き起こされる IPM の崩壊を防ぐ対策として, 様々な餌種を摂食する「広食性」の天敵を利用し, 潜在害虫の防除をも可能とする生物的防除に転換した新たな IPM の構築が挙げられる。これまでの生物的防除では, 特定の害虫種のみを防除対象とする場合, 狭い範囲の餌種を効率的に捕食可能な「狭食性」の天敵が利用されていた (Symondson et al., 2002; Taylor and Snyder, 2020)。一方, 広食性の天敵は対象作物上や周辺植生から提供される様々な代替餌を摂食し, 害虫の低密度発生時からその個体数を維

持・増加させることで防除効果を発揮する (McMurtry, 1992; Duso et al., 2004; Palevsky et al., 2010; Warburg et al., 2019). Symondson et al. (2002) によると, 広食性天敵を用いて行われた生物的防除の野外実験では, 181 例中 140 例で害虫が減少し, 作物の収量は 21 例中 20 例で増加することが示されている. 特に, フシダニ類に対しては, 寄主植物上に生息する土着広食性カブリダニによる捕食事例が多く報告されている (Sabelis, 1996). これらのことから, 我が国の果樹園では害虫の低密度発生時から広食性のニセラーゴカブリダニまたはコウズケカブリダニを利用することで, フシダニ類を防除できる可能性がある. これまでの研究により, 両種ともに一日あたり最大 300 匹以上のフシダニ個体を捕食可能であり (Kondo and Hiramatsu, 1999a), 果樹園では両種がフシダニ類の密度を潜在的に抑制していると考えられている (Kondo and Hiramatsu, 1999b). 一方, 広食性カブリダニは共通の餌種を利用する異種捕食者同士の捕食 (以下, ギルド内捕食) や同種同士の捕食 (以下, 共食い) を行う (Schausberger and Croft, 2000a, b) ため, これらの現象により一部のカブリダニ種の個体群密度が高まらず, 害虫防除効果が弱まる可能性も指摘されている (Walde et al., 1992; Schausberger and Walzer, 2001). 以上のことから, 広食性カブリダニを利用した効果的な IPM を構築するためには, 害虫防除効果の高いカブリダニの種を特定するとともに, ギルド内捕食および共食いが害虫防除効果に及ぼす影響を解明する必要がある.

本研究では, 広食性天敵を利用した果樹のフシダニ類およびハダニ類の生物的防除を目的として, 様々な微小害虫を捕食可能な土着天敵であるニセラーゴカブリダニおよびコウズケカブリダニの害虫防除における有効

性を検討した. 第 2 章では, カンキツ類のミカンサビダニを防除対象として, まず, 2 種広食性カブリダニの本害虫に対する捕食能力および密度抑制効果を評価した. 次に, 高い効果が得られたコウズケカブリダニの実用性を検証するため, 経済栽培カンキツ園に本天敵を放飼増強し, ミカンサビダニに対する防除効果を確認した. 第 3 章では, ニホンナシのニセナシサビダニおよびカンザワハダニを防除対象として, まず, 2 種広食性カブリダニのカンザワハダニに対する発生抑制効果を評価した. 次に, 高い効果が得られたコウズケカブリダニの実用性を検証するため, 経済栽培ニホンナシ園に本天敵を放飼増強し, ニセナシサビダニおよびカンザワハダニに対する防除効果を確認した. 第 4 章では, 広食性カブリダニのギルド内捕食および共食いが害虫防除に及ぼす影響を解明するため, ニセラーゴカブリダニとコウズケカブリダニのギルド内捕食と共食いの相対的な強度を比較するとともに, ミカンサビダニをモデル害虫としてこれら 2 種広食性カブリダニを単独または混合放飼し, 害虫防除効果を評価した. 第 5 章では, 得られた知見をもとに, 潜在害虫の防除をも可能とするコウズケカブリダニによる生物的防除を組み込んだ新たな IPM を提案するとともに, 広食性カブリダニによる害虫防除効果をより発揮させる生物的防除について考察した.

本研究の主要な成果は, Tsuchida and Masui (2020), 土田・増井 (2020), 土田・増井 (2021), Tsuchida and Masui (2021), および Tsuchida et al. (2022) において発表した. なお, Tsuchida and Masui (2020, 2021) および Tsuchida et al. (2022) は Springer Nature, 土田・増井 (2020, 2021) は日本応用動物昆虫学会の許諾をそれぞれ得て転載した.

第 2 章 カンキツ園における広食性カブリダニによるミカンサビダニの生物的防除

フシダニ科の一種であるミカンサビダニは世界中のカンキツ類の主要産地に広く分布している (McCoy, 1996). 本種はカンキツ類の葉や緑枝、および果実を加害する。ウンシュウミカン *Citrus unshiu* (Swingle) Marcow. の場合は、本種が 8 月から 9 月に果実を著しく吸汁加害することで果皮が黒褐色となり、果実外観を著しく損ねる被害が生じる (加藤, 1977; 関, 1979). 我が国では生食用の果実は主に青果市場に出荷されるが、被害果は市場に受け入れられないため、本害虫による果実の加害は生産者にとって重大な経済的損失となる (関, 1979; Ashihara et al., 2004). このことから、カンキツ栽培においてミカンサビダニの防除は重要である。

我が国のカンキツ栽培では主要病害であるカンキツ黒点病 (病原菌: *Diaporthe citri* (Faw.) Wolf) を防除するためにジチオカーバメート系薬剤が年間複数回散布されており、本剤はミカンサビダニにも防除効果を示すため、1980 年代以前は本害虫も同時防除されていた。しかし、1990 年代には西日本で本系薬剤に対する抵抗性を獲得した個体群が出現し、カンキツ類の生産に深刻な被害を与えた (Ashihara et al., 2004). 静岡県でもジチオカーバメート系薬剤に対する感受性が低下したミカンサビダニ個体群の発生が確認されており (土田・増井, 2018), 本害虫が多発した年には、生産者は年間 2 回程度の殺ダニ剤を追加散布して防除している (Ashihara et al., 2004; 大西ら, 2008). このようなミカンサビダニに対する薬剤の使用回数の増加は、新たな薬剤に対して抵抗性を発達させる可能性がある。また、静岡県では土着天敵を活用したミカンハダニの防除体系が確立されている (増井ら, 2018) が、ミカンサビダニに卓効を示す薬剤の一部は土着天敵に対する影響が大きい (増井・片山, 2016; 土田・増井, 2019). そのため、ミカンサビダニを薬剤により防除すると土着天敵が排除され、ミカンハダニのリサージェンスを引き起こす可能性がある (土田・増井, 2018). 以上のことから、薬剤抵抗性発達のリスクを低減し、かつ既存の IPM と矛盾なくミカンサビダニの被害を防ぐためには、今後、土着天敵を利用して本害虫の防除を可能にする新たな生物的防除が望まれる。

カンキツ類を加害するフシダニ類に対する天敵とし

て、捕食性の昆虫やダニ類、昆虫病原糸状菌などが知られており (McCoy, 1996), 特にカブリダニ類はフシダニ類の密度抑制に重要な役割を担っている (Sabelis, 1996). 我が国のカンキツ園やその周辺の樹木では主にミヤコカブリダニ、ニセラーゴカブリダニ、およびコウズケカブリダニの 3 種が発生する (大西ら, 2003; Katayama et al., 2006; 岸本ら, 2007; 増井・片山, 2017). ミヤコカブリダニはハダニ類を専門的に捕食する狭食性捕食者であるが、コウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニは複数種の微小害虫や花粉等の植物質餌も摂食する広食性捕食者である (Sabelis, 1996; McMurtry and Croft, 1997). これまでに、これら 2 種広食性カブリダニは潜在的にモモサビダニ *Aculus fockeui* (Nalepa et Trouessart) の密度を抑制していることが示唆されており (Kondo and Hiramatsu, 1999b), ミカンサビダニに対する土着天敵としての利用が期待されている (増井ら, 2018). しかし、これらの種がミカンサビダニを効果的に防除できるかは明らかにされていない。

土着の広食性カブリダニは作物上における個体群動態が種によって異なり、また、対象となる害虫種によっては防除効果が得られない場合もある (Maoz et al., 2014). このことから、ミカンサビダニの生物的防除を組み込んだ IPM を構築するためには、カブリダニの種別に本害虫に対する捕食能力および密度抑制効果を評価する必要がある。そこで、第 1 節では、コウズケカブリダニまたはニセラーゴカブリダニにミカンサビダニの成幼虫を様々な密度で与え、それぞれの最大捕食量を推定した。これら 2 種広食性カブリダニはミカンサビダニのみを餌とした場合はほとんど増殖できない (Kishimoto, 2014) が、増殖に好適な花粉を提供することでその個体群密度が高まる結果、餌として好適ではない本害虫を防除できる可能性がある。そこで、第 2 節では、コウズケカブリダニもしくはニセラーゴカブリダニの放飼と代替餌としての花粉提供を組み合わせた場合のミカンサビダニの密度抑制効果を室内および野外で検証した。最後に、第 3 節では、高い密度抑制効果が得られたコウズケカブリダニの実用性を評価するため、経済栽培カンキツ園で本天敵の保護と放飼増強によるミカンサビダニの生物的防除を確認した。

第1節 広食性カブリダニのミカンサビダニに対する捕食能力

1. 緒言

捕食者による害虫防除の有効性を予測するためには、被食者である害虫の密度の変化に対する捕食者1個体の捕食量の変化の関係を知らることが重要である (Oaten and Murdoch, 1975a, b; Riechert and Lockley, 1984). この関係は「機能の反応」(functional response: Solomon, 1949)と呼ばれ、I: 捕食量が餌密度に比例して増加, II: 捕食量の増加率が徐々に低下, III: 捕食量が一時期急激に増えるが、その後徐々に低下、の3タイプに分けられる (Holling, 1959). これまで、コウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニのフシダニ類に対する機能の反応は、モモサビダニを対象とした場合はタイプIIを示すが (Kondo and Hiramatsu, 1999a)、ミカンサビダニを対象とした場合は明らかになっていない。そこで、コウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニ雌成虫にミカンサビダニ成幼虫を様々な密度で与えた場合の捕食量を調査して機能の反応を明らかにするとともに、一日あたりの最大捕食量を推定した。

2. 材料および方法

(1) 供試虫

本試験に供したミカンサビダニの系統は2019年8月に静岡県浜松市北区東三方原町 (34.78°N, 137.73°E) のウンシュウミカン寿太郎温州に発生していた個体群を起源とする。この系統を実験室内のアクリルケージ (400 × 400 × 400 mm³) 内に設置したナツダイダイ *Citrus natsudaidai* Hayata の実生苗上で累代飼育した。コウズケカブリダニの系統は2014年6月に静岡県農林技術研究所果樹研究センター (静岡市清水区駒越西, 35.97°N, 138.49°E) 内のナツダイダイ川野夏橙に発生していた個体群を起源とする。また、ニセラーゴカブリダニの系統は2014年6月に浜松市北区三ヶ日町 (34.81°N, 137.53°E) のカンキツ園周囲に植栽されたイヌマキ *Podocarpus macrophyllus* (Thunb.) D. Don に発生していた個体群を起源とする。これらの系統は同センター (静岡市清水区茂畑, 35.08°N, 138.49°E) の20 ± 2°C, 14時間明期10時間暗期 (以降, 14L: 10D のように表記) の恒温室内で累代飼育した。飼育には、プラスチック製シャーレ (直径90 mm, 高さ20 mm) 内の水を含ませた脱脂綿上にインゲンマメ *Phaseolus vulgaris* L. の初生葉を置いて作成したリーフディスクを用い、餌とし

て両種の増殖に好適なクロマツ *Pinus thunbergii* Parl. の花粉 (増井・片山, 2019) を与え、産卵基質として毛糸を用いた。3日から4日間隔で新たな花粉を与えるとともに、卵が付着した毛糸を新たなリーフディスクに移すことで増殖した。なお、花粉は2014年から2016年の4月上旬に静岡県静岡市内のカンキツ園周辺に植栽されたクロマツから花序ごと採集し、50°Cの恒温条件で2日間開葯させた後、250 μm メッシュの篩に通過させて-20°Cで保存したものを使用した。

(2) 試験方法

プラスチック製シャーレ (直径90 mm, 高さ20 mm) 内の水を含ませた脱脂綿上に、20 × 20 mm² にカットしたウンシュウミカンの葉片を葉裏を上にして置き、アリーナを作成した。累代飼育中のナツダイダイからミカンサビダニが多寄生した葉片を切り取り、アリーナ上に静置して本種の成幼虫を接種した。24時間後にナツダイダイの葉片を除去し、アリーナ上に定着したミカンサビダニの成幼虫を実体顕微鏡 (Olympus SZX16) 下で計数した。その後、24時間絶食させた産卵開始10日以内のコウズケカブリダニもしくはニセラーゴカブリダニの雌成虫を1匹放飼し、25°C, 16L: 8Dの恒温器内に静置した。24時間後にカブリダニを除去し、放飼前のミカンサビダニ虫数から生存している虫数を引くことにより捕食された虫数を算出した。カブリダニ1個体に対してひとつの餌密度を処理し、コウズケカブリダニでは49匹、ニセラーゴカブリダニでは47匹を用いて様々な餌密度の条件下における捕食量を調査した。

得られた餌密度と捕食量の関係は、下記のHolling (1959) の円盤方程式に当てはめた。

$$n = \alpha XT / (1 + \alpha hX)$$

ここで、 n は捕食量、 X は餌密度、 T は時間 (日)、 h はハンドリングタイム、 α は求める定数である。なお、本研究の処理時間は全て24時間であるため、 $T=1$ とした。

3. 結果

コウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニのミカンサビダニに対する機能の反応をFig. 1に示した。機能の反応は、両種ともにミカンサビダニの密度が高くなるほど捕食量は増加するが増加率は徐々に低下して飽和型曲線を描く、タイプIIであった。 α はコウズケカブリダニで1.2803、ニセラーゴカブリダニでは1.2399と算出された。円盤方程式から推定したコウズケカブリ

ダニおよびニセラーゴカブリダニ雌成虫の一日あたりのミカンサビダニ成幼虫の最大捕食量は、それぞれ396.2匹および474.7匹であった。

第2節 広食性カブリダニへの代替餌としての花粉提供がミカンサビダニの生物的防除に及ぼす影響

1. 緒言

コウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニは多くのミカンサビダニ個体を捕食することが明らかになった(第1節)ものの、これら2種広食性カブリダニは本害虫のみを餌とした場合はほとんど増殖できない(Kishimoto, 2014)。対象の害虫が天敵の餌として好適でない場合、天敵の個体群密度を維持するためには代替餌を提供することが有効である(Evans et al., 1999; Landis et al., 2000; Wade et al., 2008)。多くのカブリダニにとって花粉は最も主要な代替餌である(McMurtry and Croft, 1997)が、種によって利用できる花粉種が異なる(Kishimoto et al., 2014)。増井・片山(2019)は、クロマツの花粉を餌とした場合にコウズケカブリダニ、ニセラーゴカブリダニともに内的自然増加率が高く、この花粉が両種にとって好適な代替餌であることを明らかにした。したがって、ミカンサビダニの低密度発生時からクロマツの花粉をこれら2種広食性カブリダニに提供することで、その個体群密度が高まる結果、両種にとって餌として好適ではない本害虫を防除できる可能性がある。これまでに、コウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニが発生した果樹園ではフシダニ類の密度が低くなることが確認されている(Kondo and Hiramatsu, 1999b)ものの、これらの広食性カブリダニがミカンサビダニの密度抑制に効果的であるかは明らかになっていない。そこで、コウズケカブリダニもしくはニセラーゴカブリダニを放飼し、代替餌としての花粉提供の有無を組み合わせた場合のミカンサビダニに対する密度抑制効果を室内および野外で検証した。

2. 材料および方法

(1) 供試虫および花粉

本試験に供したミカンサビダニの系統は2015年10月に静岡県農林技術研究所果樹研究センター(静岡市清水区駒越西)内のウンシュウミカン‘青島温州’に発生していた個体群を起源とする。この系統を第1節と同様の方法で累代飼育した。コウズケカブリダニおよびニセラー

ゴカブリダニは第1節と同じ系統を累代飼育して用いた。

クロマツの花粉は2016年3月に静岡県農林技術研究所果樹研究センター(静岡市清水区駒越西)内のカンキツ園周辺に植栽されたクロマツから花序ごと採集し、50°Cの恒温条件で2日間かけて開蕊させた後、250 μ mメッシュの篩に通過させて20°Cで保管したものを使用した。

(2) 室内実験

天敵の放飼(コウズケカブリダニ放飼区、ニセラーゴカブリダニ放飼区、無放飼区)に花粉提供の有無を組み合わせた6処理区を設けた。アクリルケージ(350×220×350 mm³)内に、ポリエチレンポット(直径90 mm×深さ75 mm)に定植したナツダイダイの実生苗(高さ約150 mm, 10から15展開葉)を互いの枝葉が重なるように3つ設置して1反復とし、各処理区につき4反復設けた(6処理区×3苗×4反復=計72苗を使用)。全ての実生苗の葉上に約100匹のミカンサビダニが寄生した葉片を静置して本害虫を接種した。2週間後、各実生苗から任意の4葉を直径10 mmのコルクボーラーで打ち抜き、葉片上に寄生するミカンサビダニの虫数を実体顕微鏡(Olympus SZX16)下で計数した。この時点での反復(3苗×4葉片=12葉片=942 mm²)あたりのミカンサビダニの虫数は全ての処理区で約200匹であった。産卵開始1週間以内の腹部が肥大したコウズケカブリダニまたはニセラーゴカブリダニの雌成虫を設定した処理区に従って各実生苗につき10匹放飼した。花粉を提供する処理区には3苗につき約0.02 gのクロマツの花粉を細筆を用いて葉上に振りかけた。各カブリダニは7日ごとに再放飼し、花粉は3日から4日ごとに再提供した。初回放飼の4週間後に各実生苗から同様のコルクボーラーで4葉片を打ち抜いて寄生するミカンサビダニを計数し、その後、全ての実生苗を解体してカブリダニの個体数を計数した。実験は20±1°C, 14L:10Dの恒温室内で実施した。

(3) 野外実験

実験は2016年に静岡県農林技術研究所果樹研究センター(静岡市清水区茂畑, 35.08°N, 138.49°E)の露地圃場で実施した。室内実験と同様の6処理区を設けた。試験には45 L鉢に定植された5年生のウンシュウミカン‘興津早生’および‘青島温州’(樹高約1.5 m)を用い、同一品種の3鉢を互いの枝葉が重なるように密着させて1反復とし、各処理につき2品種2反復を設けた(6処理×3鉢×2品種×2反復=計72鉢を使用)。各反復は1.5

m 以上の間隔を空けてランダムに配置した。5 月 30 日に全ての樹の葉上に約 200 匹のミカンサビダニが寄生した葉を樹あたり 5 葉の密度でステープラーを用いて固定することで本害虫を接種した。コウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニは 5 月から 7 月にかけてカンキツ園内外で個体数を増加させる（増井・片山, 2017）。そのため、5 月 12 日、5 月 24 日、および 6 月 10 日に設定した処理区に従って産卵開始 1 週間以内の腹部が肥大したコウズケカブリダニまたはニセラーゴカブリダニの雌成虫を樹あたり 30 匹放飼した。花粉を提供する処理区には 5 月 12 日、5 月 18 日、5 月 25 日、6 月 2 日、および 6 月 10 日に各反復につき 200 mL の花粉溶液を散布した。花粉溶液は落葉果樹で利用される溶液受粉技術（阪本ら, 2008）を参考に 0.008% のキサンタンガム水溶液にクロマツの花粉を 1,000 倍に希釈し、散布直前に作成した。試験に用いた樹の肥培管理は一般慣行としたが、化学農薬は使用しなかった。

5 月から 11 月にかけて毎月 1 回の頻度で各樹の 10 葉から 20 葉を擁する 1 枝を黒色のプラスチック板 (300×300 mm²) 上で 10 回叩き、落下したカブリダニ類を計数するとともに MA80 液（Saito and Osakabe, 1992）に回収した。カブリダニ類は Hoyer 氏液にマウントしてプレパラート標本を作製し、雌成虫については位相差顕微鏡（Olympus BX51）下で外部および内部形態から種を同定した（Toyoshima et al., 2013）。

5 月から 11 月にかけて毎月 1 回の頻度で各樹の任意の 5 葉を、6 月から 11 月にかけて毎月 1 回の頻度で各反復の任意の 10 果をそれぞれ採集した。採集した葉および果実に寄生するミカンサビダニの個体数を実体顕微鏡（Olympus SZX16）下で計数した。果実については果皮の果梗部、赤道面、および果頂部の各 100 mm² 上に寄生するミカンサビダニを計数し、これらの平均値に果実の表面積を乗じて果実あたりの寄生数を算出した。なお、果実は球形と仮定し、短半径を r mm として表面積を $4\pi r^2$ mm² として計算した。6 月から 10 月にかけて毎月 1 回の頻度で全ての果実について被害の有無を目視で確認し、各処理区の被害果率を算出した。

3. 統計解析

室内実験では、天敵放飼と花粉提供がカブリダニ類およびミカンサビダニの密度に及ぼす影響を一般線形モデルにより解析した。試験終了時（初回放飼 4 週間後）のカブリダニ類の個体数およびミカンサビダニの個体

数をそれぞれ応答変数とし、天敵放飼と花粉提供およびこれらの交互作用を説明変数とした。交互作用が認められた場合には単純主効果検定によりそれぞれの要因別に解析し、Bonferroni 法により有意水準を調整した。さらに、天敵放飼の効果が認められた場合には Tukey の HSD 検定により放飼したカブリダニの種間の差を解析した。

野外実験では、天敵放飼と花粉提供がカブリダニ類およびミカンサビダニの密度に及ぼす影響を線形混合モデルにより解析した。4 月から 10 月までのカブリダニ類の捕獲数と葉上および果実上のミカンサビダニの葉あたり個体数をそれぞれ応答変数とし、天敵放飼と花粉提供およびこれらの交互作用、調査日を説明変数とした。

このうち、天敵放飼と花粉提供およびこれらの交互作用を固定効果、調査日を変量効果とした。天敵放飼の効果が認められた場合には Tukey の HSD 検定により放飼したカブリダニの種間の差を解析した。なお、分散成分の推定には REML（制限付き最尤法）を用いた。天敵放飼と花粉提供が 10 月の被害果率に及ぼす影響をロジスティック回帰分析により解析した。天敵放飼の効果が認められた場合には、カブリダニの種別に放飼の効果を評価するため、各種カブリダニの放飼と無放飼を比較して解析し、Bonferroni 法により有意水準を調整した ($P < 0.05/2 = 0.025$)。カブリダニ類への花粉提供の効果を評価するため、無放飼区を含めた各放飼区について花粉提供の効果を χ^2 検定により解析し、Bonferroni 法により有意水準を調整した ($P < 0.05/3 = 0.016$)。いずれの検定でも品種の要因は説明変数に含めなかった。

検定には JMP version 12 (SAS Institute, 2015) を用いた。データを正規化するため、カブリダニおよびミカンサビダニの個体数はそれぞれ 0.5 を加算して対数変換 (Yamamura, 1999) した値を用いた。

4. 結果

(1) 室内実験

試験終了時（初回放飼 4 週間後）の実生苗上のカブリダニ類とミカンサビダニの個体数を Fig. 2 に示した。カブリダニ類の個体数は天敵放飼 ($F_{2,18} = 623.21, P < 0.0001$) と花粉提供 ($F_{1,18} = 103.62, P < 0.0001$) の効果が認められ、これらの交互作用も検出された ($F_{2,18} = 26.07, P < 0.0001$)。カブリダニ類の個体数に対する天敵放飼の効果について単純主効果検定により解析した結果、花粉提供の有無にかかわらず天敵放飼の効果が認め

られ(花粉あり: $F_{2,9} = 840.72$, $P < 0.0001$, 花粉なし: $F_{2,9} = 141.19$, $P < 0.0001$), コウズケカブリダニ放飼区のカブリダニ類の個体数はニセラーゴカブリダニ放飼区や無放飼区のそれよりも多かった(Fig. 2). カブリダニ類の個体数に対する花粉提供の効果について単純主効果検定により解析した結果, コウズケカブリダニ放飼区($F_{1,6} = 68.05$, $P < 0.0001$)およびニセラーゴカブリダニ放飼区($F_{1,6} = 43.37$, $P < 0.0001$)ともに花粉提供の効果が認められ, 花粉を提供した方が提供しない方よりもカブリダニの個体数は多かった(Fig. 2).

ミカンサビダニの個体数は天敵放飼($F_{2,18} = 64.78$, $P < 0.0001$)と花粉提供($F_{1,18} = 47.59$, $P < 0.0001$)の効果が認められ, これらの交互作用も検出された($F_{2,18} = 45.77$, $P < 0.0001$). ミカンサビダニの個体数に対する天敵放飼の効果について単純主効果検定により解析した結果, 花粉を提供した区でのみ天敵放飼の効果が認められ(花粉あり: $F_{2,9} = 69.42$, $P < 0.0001$, 花粉なし: $F_{2,9} = 2.06$, $P = 0.18$), コウズケカブリダニ放飼区のミカンサビダニの個体数はニセラーゴカブリダニ放飼区や無放飼区のそれよりも少なかった(Fig. 2). ミカンサビダニの個体数に対する花粉提供の効果について単純主効果検定により解析した結果, コウズケカブリダニ放飼区では花粉提供の効果が認められた($F_{1,6} = 66.89$, $P < 0.0001$)が, ニセラーゴカブリダニ放飼区($F_{1,6} = 0.37$, $P = 0.57$)や無放飼区($F_{1,6} = 0.13$, $P = 0.73$)では花粉提供の効果は認められなかった. コウズケカブリダニ放飼区では花粉を提供した方が提供しない方よりもミカンサビダニの個体数は少なかった(Fig. 2).

(2) 野外実験

カンキツ樹上におけるカブリダニ類の個体数, 葉上および果実上のミカンサビダニの個体数, 本害虫による被害果率の推移を Fig. 3 に示した. カブリダニ類は全ての処理区で発生が確認され, そのピークは6月から7月であった. 調査期間中にカブリダニ類以外の天敵は確認されなかった. カブリダニ類の個体数は天敵放飼の効果が認められたが($F_{2,156} = 3.90$, $P = 0.02$), 花粉提供の効果($F_{1,156} = 0.20$, $P = 0.66$)とこれらの交互作用($F_{2,156} = 0.19$, $P = 0.83$)は検出されなかった. コウズケカブリダニ放飼区のカブリダニ類の個体数は無放飼区のそれよりも多かった(Fig. 3). カブリダニ類の種構成を Table 1 に示した. 放飼したカブリダニの種や花粉提供の有無にかかわらず, コウズケカブリダニとニセラーゴカブリダニが全ての区で確認された. ただし, コウズケ

カブリダニ放飼区ではコウズケカブリダニが, ニセラーゴカブリダニ放飼区ではニセラーゴカブリダニが主体であった.

葉上のミカンサビダニの個体数は天敵放飼($F_{2,156} = 10.32$, $P < 0.0001$)と花粉提供の効果($F_{1,156} = 3.92$, $P = 0.049$)が認められたが, これらの交互作用は検出されなかった($F_{2,156} = 1.84$, $P = 0.16$). 果実上のミカンサビダニの個体数は天敵放飼の効果が認められたが($F_{2,133} = 7.82$, $P = 0.0006$), 花粉提供の効果($F_{1,133} = 3.15$, $P = 0.08$)とこれらの交互作用($F_{2,133} = 0.90$, $P = 0.41$)は検出されなかった. コウズケカブリダニ放飼区の葉上および果実上のミカンサビダニの個体数はニセラーゴカブリダニ放飼区や無放飼区のそれよりも低かった(Fig. 3).

ミカンサビダニによる10月の被害果率は天敵放飼($\chi^2 = 79.65$, $df = 2$, $P < 0.0001$)と花粉提供の効果($\chi^2 = 11.14$, $df = 2$, $P < 0.0001$)が認められたが, これらの交互作用は検出されなかった($\chi^2 = 1.22$, $df = 2$, $P = 0.54$). カブリダニの種別に放飼の効果を評価するため, コウズケカブリダニ放飼区またはニセラーゴカブリダニ放飼区と無放飼区を比較した結果, コウズケカブリダニ放飼区の被害果率のみが無放飼区のそれよりも低かった(コウズケカブリダニ放飼区 vs 無放飼区: $\chi^2 = 47.74$, $df = 1$, $P < 0.0001$, ニセラーゴカブリダニ放飼区 vs 無放飼区: $\chi^2 = 4.12$, $df = 1$, $P = 0.09$, Fig. 3). カブリダニへの花粉提供の効果を評価するため, χ^2 検定により各放飼区について解析した結果, 無放飼区では花粉提供の効果が認められたが($\chi^2 = 11.43$, $df = 1$, $P < 0.0001$), コウズケカブリダニ放飼区($\chi^2 = 1.97$, $df = 1$, $P = 0.16$)とニセラーゴカブリダニ放飼区($\chi^2 = 3.90$, $df = 1$, $P = 0.048$)ではその効果は認められなかった(Fig. 3).

第3節 経済栽培カンキツ園におけるコウズケカブリダニによるミカンサビダニの生物的防除

1. 緒言

我が国のカンキツ園に広く生息する2種広食性カブリダニのうち, 花粉等の代替餌が提供される条件下ではコウズケカブリダニによるミカンサビダニの密度抑制効果が高いことが明らかとなった(第2節). このことから, 経済栽培園においてコウズケカブリダニを利用したミカンサビダニの生物的防除の実現が期待される.

カンキツ園では, コウズケカブリダニの発生は6月に

ピークとなる(大西ら, 2003; 増井・片山, 2017)が, 一般的な経済栽培園ではカンキツ黒点病の防除のためにジチオカーバメート系薬剤が年間複数回散布されており, 第1回目の防除は幼果に感染が始まる6月上中旬である(三好ら, 2007). 本系統の薬剤はコウズケカブリダニに対して影響が大きい(土田・増井, 2019)ことから, 経済栽培園では本天敵によるミカンサビダニの密度抑制効果が十分に発揮されていない可能性がある. そこで, 静岡県内のカンキツ園において, 6月末までコウズケカブリダニに影響の小さい選択性薬剤を利用した保護防除園と慣行防除園とを比較し, 本天敵の保護効果を確認した. 加えて, 保護防除園にコウズケカブリダニを接種的に放飼し, 本天敵のミカンサビダニに対する防除効果を確認した.

2. 材料および方法

(1) 供試虫

本試験に供したコウズケカブリダニは第1節と同じ系統である. この系統を累代飼育して用いた.

(2) 試験園地および試験区

静岡県沼津市の2地域に6月末まで選択性薬剤を使用してコウズケカブリダニを保護するカンキツ園(以下, 保護防除園)をそれぞれ1園地設置した. A園(35.01°N, 138.80°E, ウンシュウミカン青島温州および寿太郎温州の混植, 樹齢20年以上, 面積約25 a)では2017年から2019年の3年間, B園(35.01°N, 138.85°E, ‘青島温州’, ‘寿太郎温州’およびネーブルオレンジ *Citrus sinensis* Osbeck var. *brasiliensis* Tanaka の混植, 樹齢20年以上, 面積約60 a)では2018年から2019年の2年間, それぞれ試験を実施した. 試験区の図を Fig. 4 に示した. 園地は急傾斜に立地した段畑(各段の間は高さ約2 mの石垣)であり, 1区を1段から3段(約3 aから8 a, ウンシュウミカン10樹から19樹)として, コウズケカブリダニ放飼区(以下, 放飼区)と無放飼区を交互に配置し, 各3反復設けた. 両園地とも調査年が変わる度に前年の放飼区と無放飼区を入れ替えて試験区を再配置した.

本試験はミカンサビダニの自然発生条件下で実施した. コウズケカブリダニの放飼は, リーフディスクから産卵開始10日以内の雌成虫約20匹と約50卵が産下された毛糸をインゲンマメ初生葉ごと取り出し, 対象樹の分枝部に挟み込むという方法で実施した. 両園地ともに各区10樹について樹あたり1から2リーフディスクの

密度で, 2017年は4月24日, 5月12日, および5月23日, 2018年は4月18日, 5月21日, および6月4日, 2019年は4月16日, 5月9日, および5月23日の各年3回(各年で雌成虫を約100匹+250卵/樹)放飼した.

保護防除園の薬剤の散布履歴を Table 2 に示した. 各園地の生産者に対し, 6月末までの防除にはコウズケカブリダニに影響の小さい薬剤(土田・増井, 2019)を指定した. 特に, カンキツ黒点病の防除には, 幼果期にジチオカーバメート系薬剤と同程度の防除効果が期待できるジチアノンフロアブル1,000倍液(井沼, 2017)の1回散布を指定した. 7月以降の薬剤散布および一般管理は各生産者に一任した.

A園およびB園に隣接する慣行防除園をそれぞれA'園(‘青島温州’および‘寿太郎温州’の混植, 樹齢20年以上, 面積約30 a)およびB'園(‘寿太郎温州’, 樹齢20年以上, 面積約50 a)として設置した. これらの園地では7月末までにカンキツ黒点病の防除を目的としてジチオカーバメート系薬剤のマンネブ水和剤600倍液が毎年5月中旬から6月中旬の間に2回散布されたが, それ以外にコウズケカブリダニに影響のある薬剤は散布されなかった.

(3) 調査方法

1) ダニ類

コウズケカブリダニの個体数が増加する4月から7月まで毎月1回の頻度で保護防除園および慣行防除園のカブリダニ類の個体数を調査した. 事前にマークした(放飼区ではコウズケカブリダニを放飼した)各区10樹について, 各樹の3箇所(約150葉を擁する枝葉/箇所)をA4版の黒色プラスチック板上で各10回叩き, 落下した虫数を計数した. 落下した全てのカブリダニ類は第2節と同様の方法で回収し, 種同定した.

4月から11月まで毎月1回の頻度で保護防除園の放飼区と無放飼区のミカンサビダニの個体数を調査した. 前述の各区10樹について, 各樹の任意の10葉(100葉/区)をサンプリングしてクーラーボックスに入れ, 葉裏に寄生する成幼虫数を実体顕微鏡(Olympus SZX16)下で計数し, 葉あたり個体数を算出した. なお, サンプリングは各調査年の春に展開した葉のみとした.

2) 果実被害

6月から11月まで毎月1回の頻度で保護防除園の放飼区と無放飼区の被害果率を調査した. 2017年は着果量が少なかったため, 平均的な着果量の4樹を事前にマ

ークし、各樹の任意の50果(200果/区)についてミカンサビダニによる被害の有無を目視により調査し、各区の被害果率を算出した。2018年、2019年は着果量が多かったため、各区につき平均的な着果量の5樹の各3垂主枝を事前にマークし、各垂主枝の任意の40果(600果/区)を前述と同様に調査して各区の被害果率を算出した。

(4) 統計解析

コウズケカブリダニの放飼がカンキツ樹上に発生するカブリダニ類の個体数に及ぼす影響を一般線型モデルにより園地別に解析した。両園地ともにカブリダニ類の発生ピークである6月の捕獲個体数を応答変数とし、放飼と年およびこれらの交互作用を説明変数とした。交互作用が認められた場合には単純主効果検定によりカブリダニ類の個体数に対する放飼の効果を年別に解析し、Bonferroni法により有意水準を調整した(A園: $P < 0.05/3 = 0.016$)。

コウズケカブリダニの放飼が葉上のミカンサビダニの密度に及ぼす影響を線形混合モデルにより園地別に解析した。A園ではミカンサビダニの発生が認められた2017年および2018年の6月(カブリダニ類の発生ピーク)から11月までの葉あたり個体数を応答変数とし、放飼と年および年にネストされた調査日を説明変数とした。このうち、放飼と年およびこれらの交互作用を固定効果、年にネストされた調査日を変量効果とした。B園ではミカンサビダニの発生が認められた2018年の6月から11月までの葉あたり個体数を応答変数とし、放飼、調査日を説明変数とした。このうち放飼を固定効果、調査日を変量効果とした。なお、分散成分の推定にはREMLを用いた。

コウズケカブリダニの放飼がミカンサビダニの被害果率に及ぼす影響を、一般化線形モデルにより園地別に解析した。A園では2017年および2018年の11月の値を用いて放飼と年およびこれらの交互作用を説明変数とするロジスティック回帰分析により解析した。交互作用が認められた場合は、 χ^2 検定により被害に対する放飼の効果を年別に解析し、Bonferroni法により有意水準を調整した($P < 0.05/2 = 0.025$)。B園では2018年11月の値を用いて放飼を説明変数とする χ^2 検定により解析した。

検定にはJMP version 12 (SAS Institute, 2015)を用いた。データを正規化するため、ダニ類の個体数はそれぞれ0.5を加算して対数変換(Yamamura, 1999)した値を用いた。いずれの検定でも品種の要因は説明変数に

含めなかった。

3. 結果

コウズケカブリダニを保護したA園およびB園のカブリダニ類の個体数の推移と6月の種構成をFig. 5に示した。A園における2017年から2019年の6月のカブリダニ類の個体数は放飼の効果($F_{1,12} = 25.23$, $P = 0.0003$)と年の影響($F_{2,12} = 143.01$, $P < 0.0001$)が認められ、これらの交互作用も検出された($F_{2,12} = 35.63$, $P < 0.0001$)。カブリダニ類の個体数に対する放飼の効果について単純主効果検定により年別に解析した結果、2017年は有意な差が認められなかった($F_{1,4} = 8.51$, $P = 0.04$)が、2018年($F_{1,4} = 175.96$, $P = 0.0002$)と2019年($F_{1,4} = 21.94$, $P = 0.0094$)には有意な差が認められた。2018年と2019年の両年とも放飼区のカブリダニ類の個体数は無放飼区のそれよりも多かった(Fig. 5)。B園における2018年と2019年の6月のカブリダニ類の個体数は放飼の効果($F_{1,12} = 204.79$, $P < 0.0001$)と年の影響($F_{1,12} = 18.56$, $P = 0.0026$)が認められたが、これらの交互作用は検出されなかった($F_{1,12} = 0.01$, $P = 0.96$)。2019年のカブリダニ類の個体数は2018年のそれよりも多く、いずれの年も放飼区のカブリダニ類の個体数は無放飼区のそれよりも多かった(Fig. 5)。6月の種構成は、放飼の有無にかかわらず、全ての年でコウズケカブリダニが主体であった。保護防除園(A園およびB園)に隣接する慣行防除園(A'園およびB'園)の6月のカブリダニ類の個体数および種構成をTable 3に示した。A園およびB園では無放飼区でも全ての調査年でカブリダニ類が多数捕獲されたのに対し、A'園およびB'園では2017年と2019年に少数が捕獲されたのみであった。捕獲されたカブリダニ類はニセレーゴカブリダニもしくはミヤコカブリダニが主体であった。

ミカンサビダニの葉あたり個体数の推移をFig. 6に示した。2019年は両園地ともに本害虫の発生が認められなかった。A園における2017年および2018年の6月から11月までのミカンサビダニの葉あたり個体数は放飼の効果が認められた($F_{1,58} = 7.83$, $P = 0.007$)が、年の影響は認められず($F_{1,58} = 1.87$, $P = 0.20$)、これらの交互作用も検出されなかった($F_{1,58} = 0.04$, $P = 0.84$)。放飼区のミカンサビダニの個体数は無放飼区のそれよりも少なかった(Fig. 6)。B園における2018年6月から11月までのミカンサビダニの葉あたり個体数は放飼の効果が認められ($F_{1,29} = 7.22$, $P = 0.012$)、放飼区の

ミカンサビダニの個体数は無放飼区のそれよりも少なかった (Fig. 6).

ミカンサビダニによる累積被害率の推移を Fig. 7 に示した. 2019 年は両園地ともに被害果が認められなかった. 11 月の累積被害率は, A 園では放飼の効果 ($\chi^2 = 59.53$, $df = 1$, $P < 0.0001$) と年の影響 ($\chi^2 = 114.88$, $df = 1$, $P < 0.0001$) が認められ, 交互作用も検出された ($\chi^2 = 38.87$, $df = 1$, $P < 0.0001$). 累積被害率に対する放飼の効果について年別に解析した結果, 2017 年 ($\chi^2 = 6.12$, $df = 1$, $P = 0.0133$) と 2018 年 ($\chi^2 = 352.60$, $df = 1$, $P < 0.0001$) の両年ともに有意な差が認められ, いずれの年も放飼区の累積被害率は無放飼区のそれよりも低かった (Fig. 7). B 園では, 放飼区の 11 月の累積被害率は無放飼区のそれよりも有意に低かった ($\chi^2 = 92.84$, $df = 1$, $P < 0.0001$; Fig. 7).

第 4 節 考察

静岡県内では複数の薬剤に対する感受性が低下したミカンサビダニが多発しており (土田・増井, 2018), 生産者は殺ダニ剤を多回数散布して防除している. このようなミカンサビダニに対する化学農薬の使用回数の増加は, 本害虫の薬剤抵抗性発達のリスクを高めるのみならず, 天敵を排除することで他の害虫のリサージェンスを引き起こす可能性もある. そこで, ここでは, 化学農薬のみに頼らないミカンサビダニの防除方法として, 土着の広食性カブリダニを利用した生物的防除について議論する. 初めに, 我が国のカンキツ園に生息するコウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニのミカンサビダニに対する捕食能力を明らかにするとともに, 室内および野外実験によりこれら 2 種広食性カブリダニの本害虫に対する密度抑制効果を評価した. その結果, 両種ともに多くのミカンサビダニ成幼虫を捕食するが, 実際の利用場面を想定したカンキツ類の苗や樹を用いた場合はコウズケカブリダニのみがミカンサビダニの密度およびその被害を抑制可能であることが明らかとなった. これまで, ミカンサビダニの密度抑制効果が確認されている天敵はフロリダにおけるフシダニカビの一種 *Hirsutella thompsonii* Fisher のみであり (McCoy, 1996), 我が国では本害虫の有力な天敵はいないと考えられていた (芦原, 2001). このことから, 本研究は, コウズケカブリダニがミカンサビダニの防除に有効な天敵であることを明らかにした初めての報告である. さらに, 経済栽培カンキツ園においてコウズケカブリダニに

影響の小さい薬剤を使用して本天敵を保護するとともに, 本天敵を放飼増強することで, ミカンサビダニの防除が可能であることを明らかにした. これまで, 我が国ではミカンサビダニの防除方法は化学的防除以外に知られていないが, 本研究により, 経済栽培園におけるコウズケカブリダニの利用による生物的防除の実現可能性が新たに示された.

コウズケカブリダニやニセラーゴカブリダニにとってミカンサビダニはその発育や産卵に適した餌種ではない (Kishimoto, 2014). 一方, ミカンサビダニ成幼虫に対する一日あたり最大捕食量はコウズケカブリダニが約 400 匹, ニセラーゴカブリダニが約 500 匹と推定され (Fig. 1), これら 2 種広食性カブリダニは好適ではない餌 (害虫) でも多くの個体を捕食できると考えられる. 本研究と同様の手法によりカブリダニのフシダニ類に対する一日あたり最大捕食量を推定した報告によると, コウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニはモモサビダニをそれぞれ約 300 匹および約 400 匹捕食する (Kondo and Hiramatsu, 1999a). また, 我が国でも生物的防除資材として利用されているスワルスキーカブリダニ *Amblyseius swirskii* Athias-Henriot は, トマトサビダニ *Aculops lycopersici* (Massee) を一日あたり最大 103.4 匹捕食する (Park et al., 2010). これらの結果と比較すると, コウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニはミカンサビダニに対して高い捕食能力を持つと考えられる.

ミカンサビダニに対する一日あたり最大捕食量はニセラーゴカブリダニの方がコウズケカブリダニよりも多く, このことは Kondo and Hiramatsu (1999a) がモモサビダニを餌とした場合でも同様であった. このことから, フシダニ類に対する相対的な捕食量はニセラーゴカブリダニの方がコウズケカブリダニよりも多いと考えられる. しかし, これら 2 種広食性カブリダニをミカンサビダニが寄生したカンキツ類の苗や樹上に放飼して密度抑制効果を比較した結果, コウズケカブリダニは本害虫の密度を抑制できたが, ニセラーゴカブリダニは抑制できなかった (Fig. 2, 3). 海外でも, これらのカブリダニと同属の *Euseius* 属および *Amblyseius* 属のフシダニ類に対する密度抑制効果が調査されており, 花粉が提供される条件では *Euseius stipulatus* (Athias-Henriot) や *Euseius scutalis* (Athias-Henriot) はカンキツ類を加害するフシダニの一種 *Phyllocoptruta oleivora* Ashmead の密度を抑制できるが, スワルスキーカブリ

ダニはその密度を抑制できないことが報告されている (Maoz et al., 2014; Warburg et al., 2019). 以上のことから、コウズケカブリダニが属する *Euseius* 属カブリダニは、その個体群密度が維持された場合には様々な種類のフシダニの密度を抑制できる可能性がある。イスラエルやオーストラリアのカンキツ園では *Euseius* 属カブリダニがローズグラス *Chloris gayana* Kunth の花粉を利用して個体数を増加させ、カンキツ類を加害するフシダニ類の増加を抑制することが知られている (Smith and Papacek, 1991; Maoz et al., 2014; Warburg et al., 2018). 我が国でも、クスノキ *Cinnamomum camphora* (L.) の葉上でダニ室の内部に生息するフシダニの一種 (sp. 1) を餌としてコウズケカブリダニが定着し、虫嚙を引き起こす別種のフシダニ (sp. 2) を捕食してその被害を抑制することが知られている (Kasai et al., 2005). したがって、果樹園におけるコウズケカブリダニのフシダニ類に対する防除の有効性は、本天敵の餌としての栄養上の適性にかかわらず、代替餌が供給される条件下で評価する必要がある。

天敵への代替餌の提供は、対象の害虫の密度が低い場合や害虫が天敵の餌として好適でない場合にその密度を維持する上で有効である (Evans et al., 1999; Landis et al., 2000; Wade et al., 2008). そこで、第2節では室内および野外条件において、コウズケカブリダニもしくはニセラーゴカブリダニの放飼と両天敵の増殖に好適な花粉の提供を組み合わせ、ミカンサビダニの密度および果実被害抑制効果を評価した。室内実験では、コウズケカブリダニの放飼と花粉の提供とを組み合わせることで、本天敵の個体数が増加した結果、ミカンサビダニに対する密度抑制効果が強化された (Fig. 2). 周辺植生からの風媒花粉が飛散していたと考えられる野外実験では、花粉提供の有無にかかわらず、コウズケカブリダニ放飼区ではカブリダニ類の個体数は無放飼区のそれよりも多く、ミカンサビダニの密度や被害率は無放飼区のそれと比較して低かった (Fig. 3). 以上のことから、土着天敵によるミカンサビダニの生物的防除は、花粉等の代替餌が存在する条件下でコウズケカブリダニを利用することが有効であり、花粉の提供は本天敵の密度を高めることから、ミカンサビダニに対する密度抑制効果を強化することが明らかとなった。なお、野外試験では無放飼区でもコウズケカブリダニとニセラーゴカブリダニが捕獲されたことから、試験は土着の2種広食性カブリダニが存在する条件下で実施されたと考えられる。

ニセラーゴカブリダニと同属のスワルスキーカブリダニはコウズケカブリダニと同属の *E. scutalis* よりも優位なギルド内捕食者であるため、その存在が *E. scutalis* の密度に負の影響を及ぼす可能性も指摘されている (Maoz et al., 2014). これらのことから、広食性カブリダニの種間相互作用がミカンサビダニの生物的防除に影響する可能性も残されており、この点については第4章で詳細に検証する。

病害虫防除と土着天敵の保護を両立させるためには、天敵に影響のある時期の化学農薬の使用回避や影響のない薬剤の選択などが必要となる (Ruberson et al., 1998). カンキツ樹上では、コウズケカブリダニの発生は春から初夏にピークとなる (Fig. 3) ことから、この時期の病害虫防除には選択性薬剤を利用して本天敵を保護することで、本天敵のミカンサビダニに対する防除効果が発揮されと考えられる。そこで、第3節では、経済栽培カンキツ園において6月末までコウズケカブリダニに影響の小さい薬剤 (土田・増井, 2019) を使用して本天敵を保護するとともに、本天敵の接種的放飼によるミカンサビダニの防除効果を確認した。その結果、慣行防除園ではカブリダニ類が少数しか確認されなかった (Table 3) が、選択性薬剤を利用した保護防除園ではカブリダニ類が多数捕獲され、その優占種はコウズケカブリダニであった (Fig. 5). この保護防除園にコウズケカブリダニを接種的に放飼すると、年によってその効果は異なるものの、無放飼区よりもカブリダニ類の個体数は多くなり、逆にミカンサビダニの個体数は少なかった (Fig. 6). また、コウズケカブリダニ放飼区における被害率は無放飼区のそれと比較して低かった。以上のことから、選択性薬剤を利用することでコウズケカブリダニが保護され、さらに、本天敵を放飼増強することでミカンサビダニを防除可能であることが明らかとなった。

いずれの慣行防除園でも毎年5月中旬から6月中旬に幼果期のカンキツ黒点病の感染予防を目的としたジチオカーバメート系薬剤が散布されているが、本系統の薬剤はコウズケカブリダニに対する影響が大きい (土田・増井, 2019). 一方、保護防除園で使用されたジチアノンはコウズケカブリダニ雌成虫の生存や産卵に及ぼす影響が小さい (土田・増井, 2019). このことから、慣行防除園ではコウズケカブリダニの発生が抑制され、保護防除園では試験設計の意図通り本天敵が保護されと考えられる。また、本研究を実施した地域のミカンサビダニ個体群はジチオカーバメート系薬剤に対する感受性

が低下しており（土田・増井, 2018）, A 園では本系統の薬剤が 2017 年と 2018 年に各 3 回, B 園では 2018 年に 3 回散布されたにもかかわらず, 全ての区で被害果が認められた (Table 2, Fig. 7). これらのことから, 経済栽培園で本害虫が多発する要因のひとつとして, ジチオカーバメート系薬剤の散布によるコウズケカブリダニの排除とミカンサビダニの感受性低下によるリサーチエンスの可能性が示唆された. 岡山県のモモ *Prunus persica* (L.) Batsch 園でも初夏の合成ピレスロイド系殺虫剤の散布によりコウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニが影響を受け, モモサビダニのリサーチエンスが引き起こされる (Kondo and Hiramatsu, 1999b). 以上のことから, 果樹園におけるフシダニ類のリサーチエンスを防ぐためには土着の広食性カブリダニの発生時期には選択性薬剤を利用するなど, 殺菌剤を含めた防除体系の再検討が必要である.

コウズケカブリダニはミカンサビダニのみを餌として飼育した場合, 成虫まで発育できないが (Kishimoto, 2014), 代替餌を提供することにより本天敵の個体群密度が高まる結果, 餌として好適ではない本害虫の密度を抑制できる (第 2 節). また, コウズケカブリダニ雌成虫はミカンサビダニ成幼虫を一日あたり最大で約 400 匹捕食可能と推定された (第 1 節). これらのことから, 調査した園地は周辺植生から風媒花粉等の代替餌が供給される条件であり, かつコウズケカブリダニ放飼区では本天敵が放飼増強されて 6 月に高密度に発生した結果, 多数のミカンサビダニが捕食されて無放飼区よりも葉上の密度が低くなった (Fig. 6) と考えられる. さらに, ミカンサビダニの葉から果実への移動や果実上での増

殖は 6 月に始まる (関, 1979; 大西ら, 2008) ため, コウズケカブリダニ放飼区では果実に寄生する本害虫の初期密度が抑制された結果, 無放飼区よりも被害果率が低く推移した (Fig. 7) と推察される. 一方, ミカンサビダニの発生活長や被害は年や園地によって大きく異なり, 特に A 園では 2017 年と 2018 年の 11 月に無放飼区の被害果率がそれぞれ 23.7% および 48.1% と高くなった (Fig. 7). これまで, ミカンサビダニが減農薬や化学農薬不使用のカンキツ園で多発する傾向があるのは, 有力な天敵がいなかったためと考えられていた (芦原, 2001). しかし, たとえ 6 月にコウズケカブリダニの密度が高くなったとしても, 本天敵の密度は 7 月から 8 月には低下する (Fig. 3). コウズケカブリダニのミカンサビダニに対する機能の反応はタイプ II であり (Fig. 1), このことは, ミカンサビダニが一定数以上で増加を始めるとコウズケカブリダニは捕食によって本害虫の増加を抑制できないことを示唆している. 以上のことから, 本天敵は夏季以降のミカンサビダニの増加を抑制できない可能性がある.

結論として, 土着天敵によるミカンサビダニの生物防除は, 害虫の低密度発生時から花粉等の代替餌が存在する条件下でコウズケカブリダニを利用することが有効であり, 経済栽培園では春から初夏にかけて本天敵を保護および放飼増強することで実現できる. ただし, 本天敵の保護のみでは栽培期間を通してミカンサビダニを防除することは困難な場合もある. 今後は, 夏季のコウズケカブリダニの密度低下要因を解明した上で, カンキツ樹上における本天敵の個体群の維持・増殖技術を検討する必要がある.

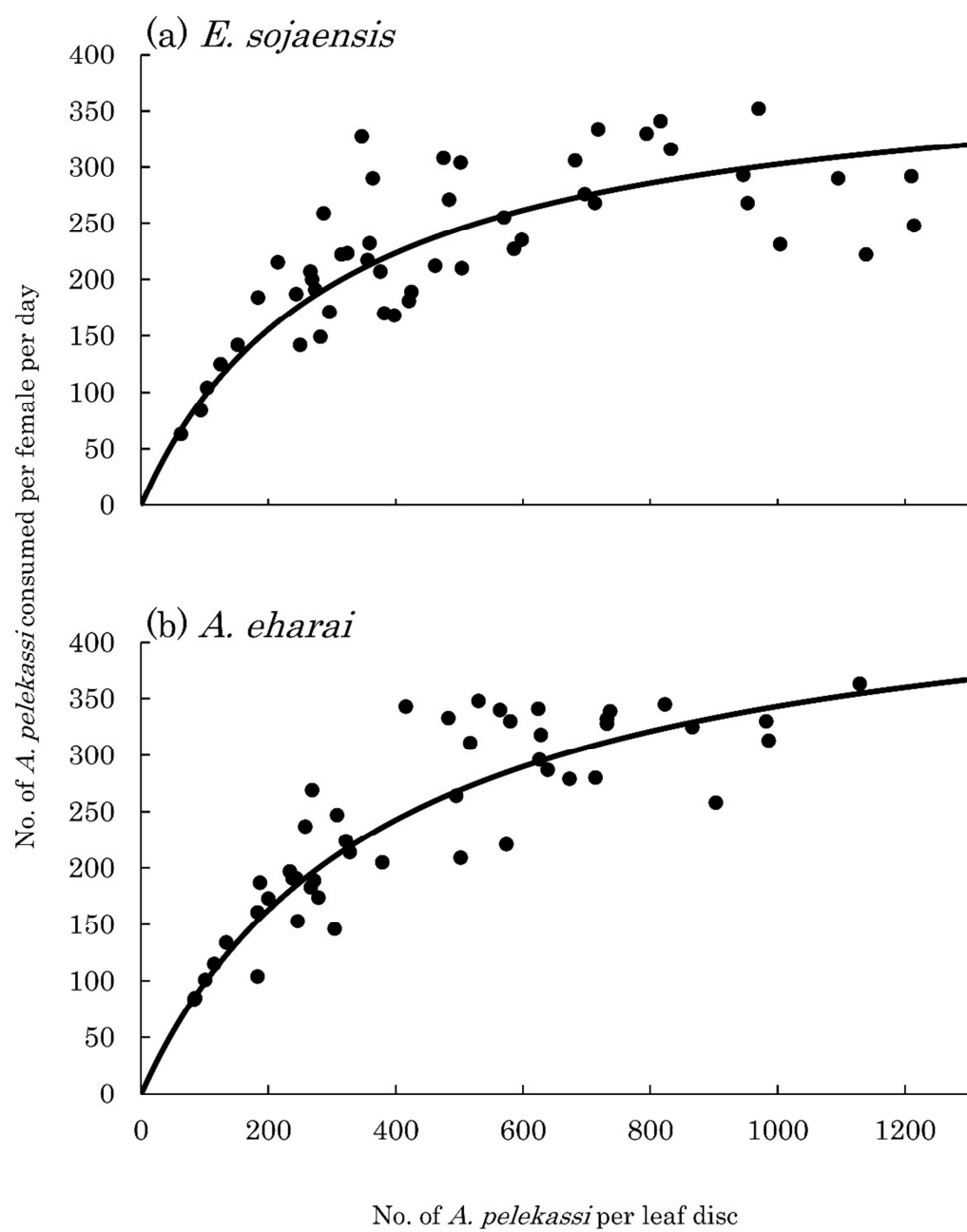


Fig. 1 Functional response of two species female of generalist phytoseiid mites, (a) *Euseius sojaensis* and (b) *Amblyseius eharai*, to the density of nymphs and adults of *Aculops pelekassi*. Curves were fitted to Holling's disc-equation (*E. sojaensis*: $y = x / (0.781 + 2.524 \times 10^{-3}x)$, *A. eharai*: $y = x / (0.807 + 2.107 \times 10^{-3}x)$)

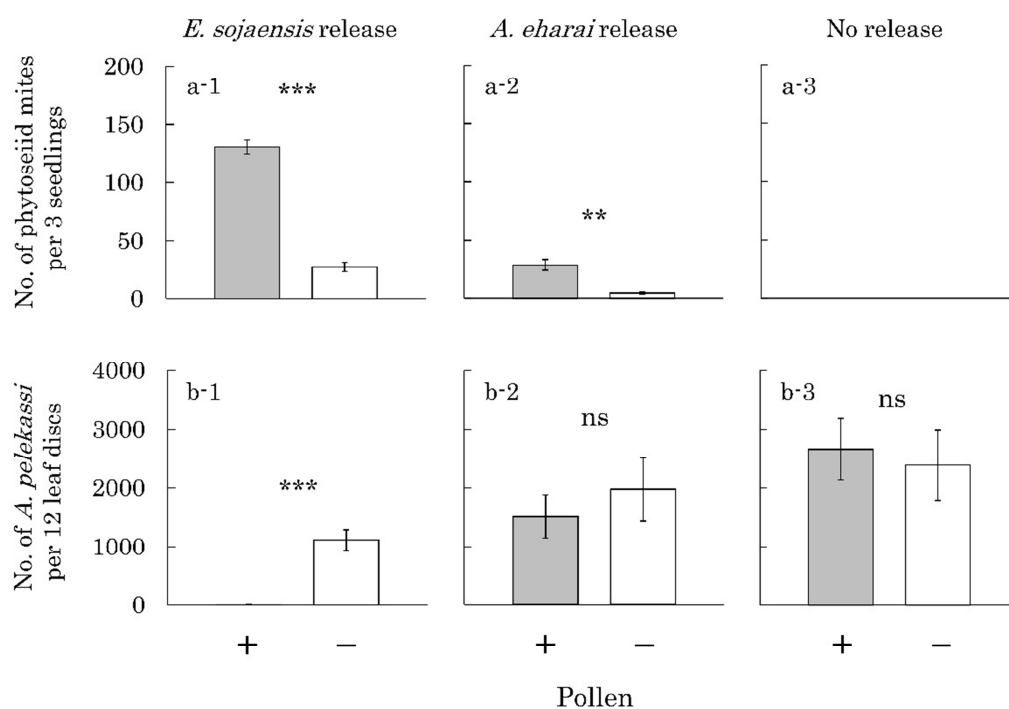


Fig. 2 Mean number of (a) phytoseiid mites and (b) *Aculops pelekassi* on citrus seedlings at the end of the trial in three predator release treatments: (1) *Euseius sojaensis* release, (2) *Amblyseius eharai* release, and (3) no release. Error bars indicate SE. The number of *A. pelekassi* was counted on 4 leaf discs (=314 mm²) × 3 seedlings. Asterisks indicate a significant difference between treatments with and without pollen, according to a simple main effect test weighted by using the Bonferroni correction (** $P < 0.01/3$, *** $P < 0.001/3$). 'ns' indicates no significant difference

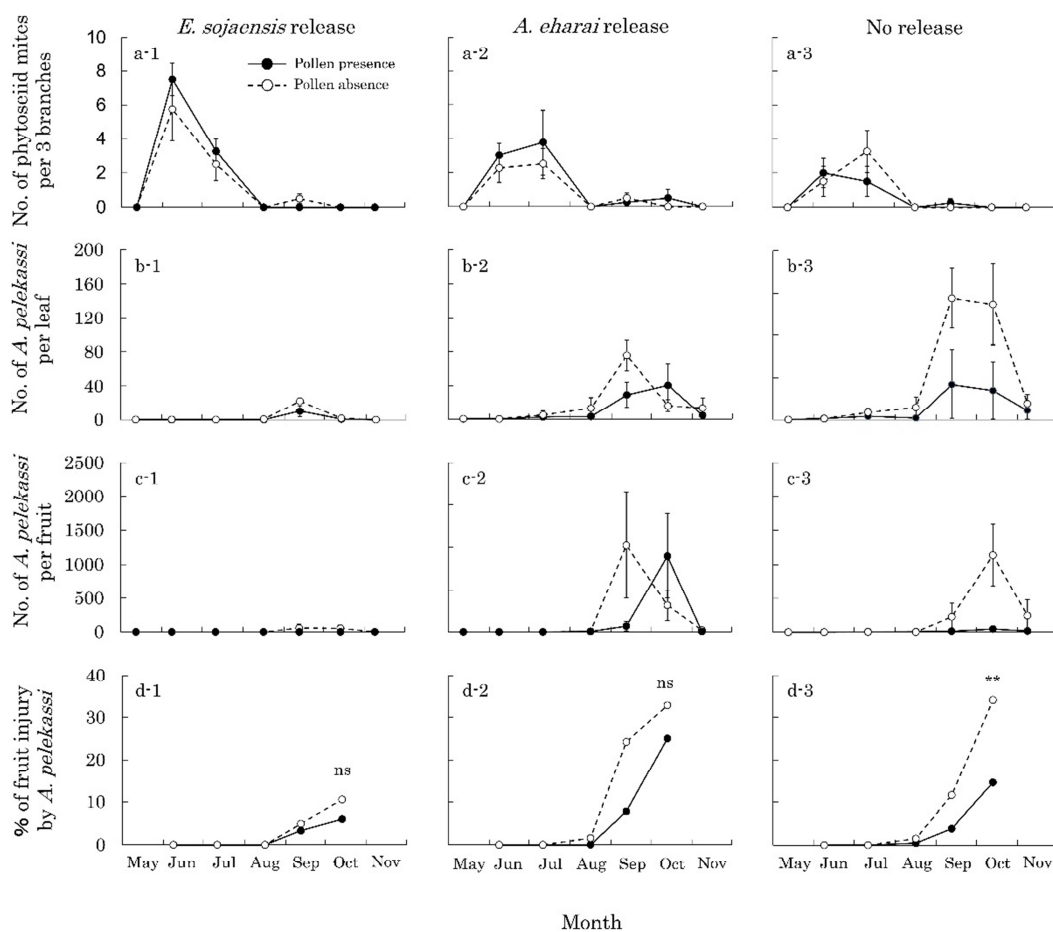


Fig. 3 Seasonal fluctuations in average numbers of (a) phytoseiid mites, (b) *A. pelekassi* on leaves, (c) *A. pelekassi* on fruit, and (d) fruit injury on citrus trees in 2016 in three predator release treatments: (1) *E. sojaensis* release, (2) *A. eharai* release, and (3) no release. Asterisks indicate a significant difference in fruit injury between treatments with and without pollen in October, according to a chi-squared test weighted by using the Bonferroni correction (** $P < 0.01/3$). 'ns' indicates no significant difference. Error bars indicate SE

Table 1 Species composition of adult females of phytoseiid mites captured by beating on citrus trees in 2016

Treatment		No. of identified adult females	
Predator release	Pollen provision	<i>E. sojaensis</i>	<i>A. eharai</i>
<i>Euseius sojaensis</i>	+	24 (80.0)	6 (20.0)
	—	18 (81.8)	4 (18.2)
<i>Amblyseius eharai</i>	+	3 (16.7)	15 (83.3)
	—	7 (41.1)	10 (58.9)
No release	+	3 (33.3)	6 (66.7)
	—	8 (66.7)	4 (33.3)

Numbers in parentheses indicate percentages of each species

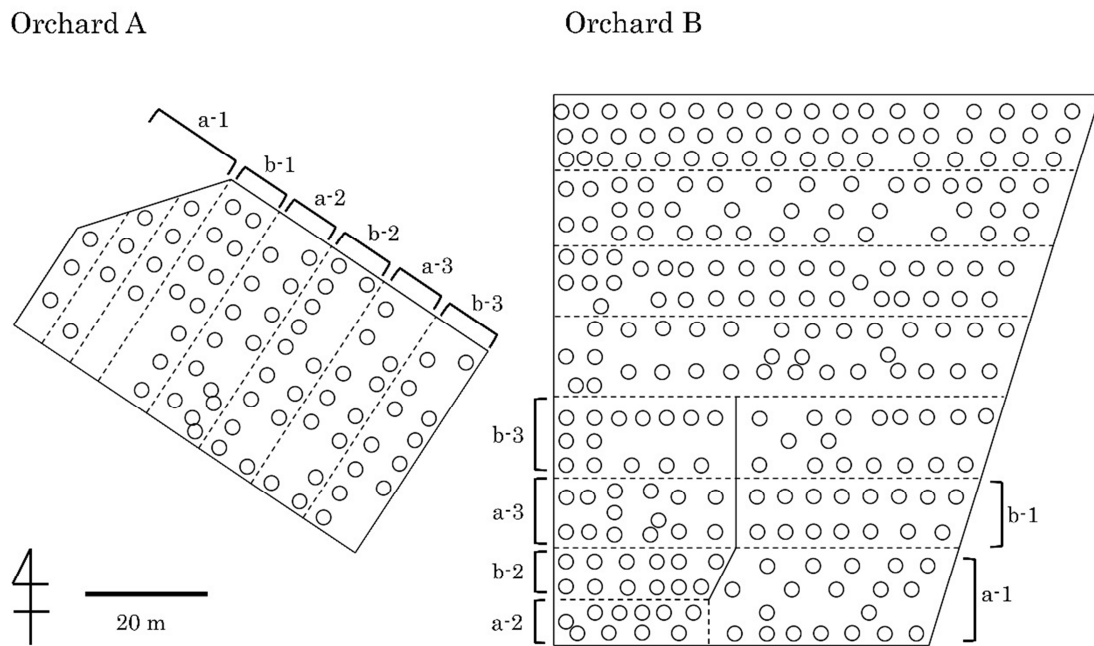


Fig. 4 Schematic diagrams of two experimental terraced citrus orchards in conservation control until late June in Numazu, Shizuoka, Japan. Open circles: citrus trees (2–3 m tall). Solid lines: windbreaks and edges. Broken lines: step of stone walls (about 2 m height). Investigation was conducted in 2017 to 2019 in orchard A and in 2018 to 2019 in orchard B. Two treatments were designed with three replications in each orchard: in 2017 and 2019, *Euseius sojaensis* release was in a-1, 2 and 3 but not in b-1, 2 or 3; in 2018, it was released in b-1, 2 and 3, but not in a-1, 2 or 3. The conventional-control orchards A' and B' which were located next to each experimental orchard, are omitted from these diagrams

Table 2 Pesticide use histories in two experimental citrus orchards

Orchard A

Time of application	2017	2018	2019
Early April			Dithianon 42.0% FL (1,000) Sulfur 52.0% FL (500)
Mid-April	Petroleum oil 97.0% EC ^b (100) Dithianon 42.0% FL (1,000)		
Late April		Dithianon 42.0% FL (1,000)	
Mid-May		Petroleum oil 97.0% EC (100) Mixture of pyraclostrobin 6.8% & boscalid 13.6% WDG (2,000)	
Late May	Petroleum oil 97.0% EC (150)		Petroleum oil 97.0% EC (100) Mixture of pyraclostrobin 6.8% & boscalid 13.6% WDG (2,000)
Early June	Dithianon 42.0% FL (1,000)	Pyrifluquinazon 20.0% WDG (3,000) Dithianon 42.0% FL (1,000)	
Mid-June			Mixture of tiameothoxam 10.0% & lufenuron 5.0% WDG (3,000) Dithianon 42.0% FL (1,000)
Early July	Chlorfenapyr 10.0% FL (4,000) Methidathion 40.0% EC (1,500) Maneb 75.0% WP (600)		
Mid-July		Lufenuron 5.0% EC (2,000) Methidathion 40.0% EC (1,500) Mancozeb 80.0% WP (500)	
Late July			Chlorfenapyr 10.0% FL (4,000) Mancozeb 80.0% WP (500)
Early August	Dinotefuran 20.0% WSG (2,000) Mancozeb 80.0% WP (500)		Dinotefuran 20.0% WSG (2,000) Mancozeb 80.0% WP (500)
Mid-August		Chlorfenapyr 10.0% FL (4,000) Mancozeb 80.0% WP (500)	
Late September	Chlorfenapyr 10.0% FL (4,000) Pyflubumid 20.0% FL (4,000) Mancozeb 80.0% WP (500)	Fenprothrin 10.0% EC (2,000) Mixture of pyflubumide 15.0% & fenpyroximate 5.0% FL (3,000) Mancozeb 80.0% WP (500)	Dinotefuran 20.0% WSG (2,000) Mixture of pyflubumide 15.0% & fenpyroximate 5.0% FL (3,000) Mancozeb 80.0% WP (500)

Orchard B

Time of application	2018	2019
Late March	Petroleum oil 97.0% EC (60)	
Mid-April		Sulfur 52.0% FL (500)
Mid-May	Petroleum oil 97.0% EC (100) Mixture of cyprodinil 37.5% & fludioxonil 25.0% WDG (3,000)	
Late May		Buprofezin 20.0% FL (1,000) Petroleum oil 97.0% EC (100) Mixture of pyraclostrobin 6.8% & boscalid 13.6% WDG (2,000)
Mid-June	Imidacloprid 50.0% WDG (10,000) Dithianon 42.0% FL (1,000)	Mixture of tiameothoxam 10.0% & lufenuron 5.0% WDG (3,000) Dithianon 42.0% FL (1,000)
Mid-July	Chlorfenapyr 10.0% FL (4,000) Mancozeb 80.0% WP (500)	Chlorfenapyr 10.0% FL (4,000) Mancozeb 80.0% WP (500) DMTP 40.0% EC (1,500)
Mid-August	Mixture of pyflubumide 15.0% & fenpyroximate 5.0% FL (3,000) Mancozeb 80.0% WP (500)	Mixture of pyflubumide 15.0% & fenpyroximate 5.0% FL (3,000) Mancozeb 80.0% WP (500)
Early October	Acequinocyl 15.0% FL (1,500) Mancozeb 80.0% WP (500)	

^a EC: emulsion concentrate, FL: flowable, WDG: water-dispersible granules, WP: wettable powder, WSG: water-soluble granules^b Numbers in parentheses indicate dilution ratio

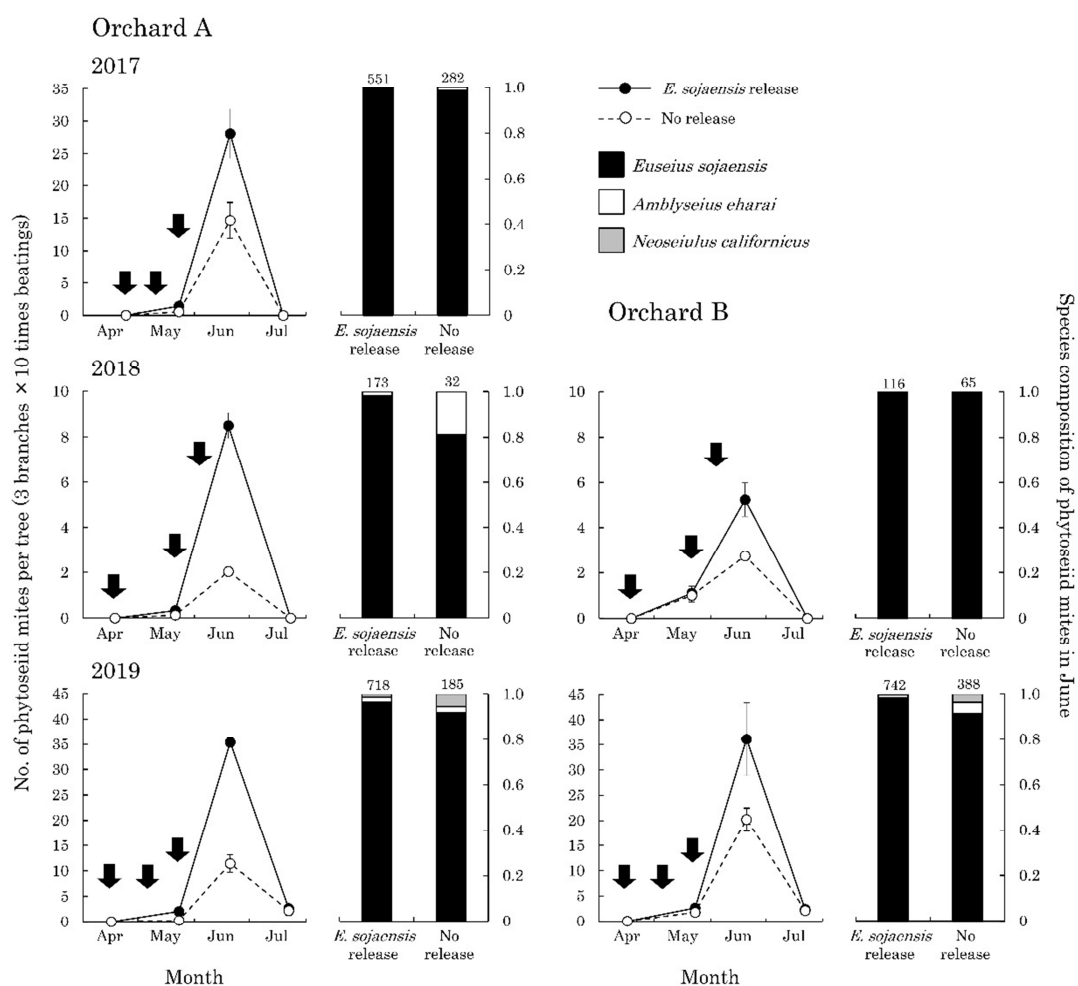


Fig. 5 Seasonal changes in the mean density of phytoseiid mites and species composition in June in two experimental orchards. Arrows indicate *E. sojaensis* release dates. Numbers on bars indicate the number of identified adult females. Error bars indicate SE

Table 3 Total number and species composition of phytoseiid mites collected from conventional-control

Orchard ^a	Year	Total number ^b	No. of identified adult female		
			<i>Euseius sojaensis</i>	<i>Amblyseius eharai</i>	<i>Neoseiulus californicus</i>
A'	2017	13	2 (25.0) ^c	6 (75.0)	0 (0)
	2018	0	-	-	-
	2019	12	1 (12.5)	2 (25.0)	5 (62.5)
B'	2018	0	-	-	-
	2019	20	2 (13.3)	12 (80.0)	1 (6.7)

^a Maneb, which is harmful to *E. sojaensis* was applied two times every year during mid-May to mid-June in orchards A' and B' located next to orchards A and B shown in Fig. 1

^b Phytoseiid mites were collected from 10 trees (3 branches per tree × 10 times beatings)

^c Numbers in parentheses indicate percentage of each species

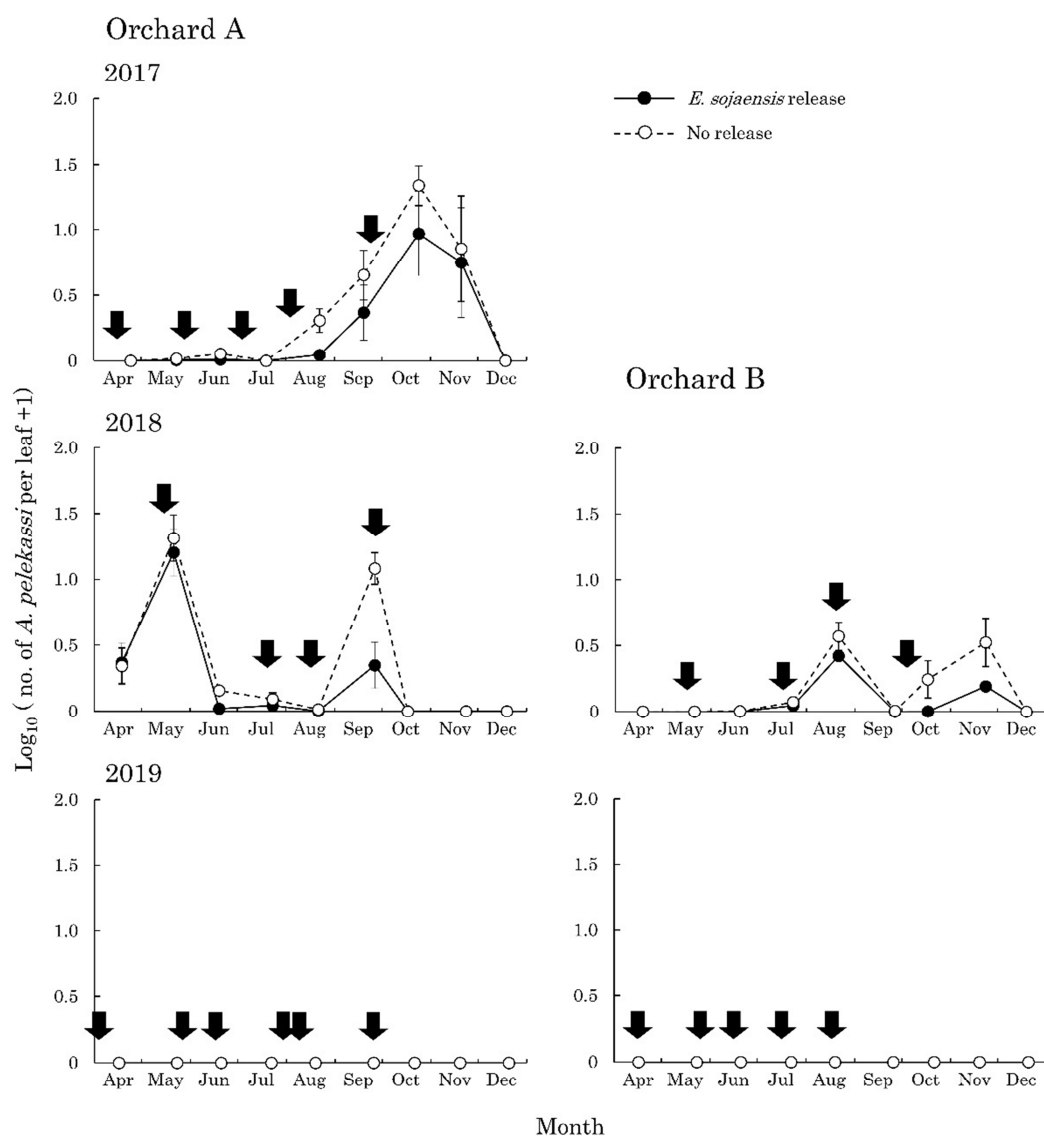


Fig. 6 Seasonal changes in the mean density of *Aculops pelekassi* on the leaves in two experimental orchards. Arrows indicate application of registered pesticides for *A. pelekassi* control (Table 2). Error bars indicate SE

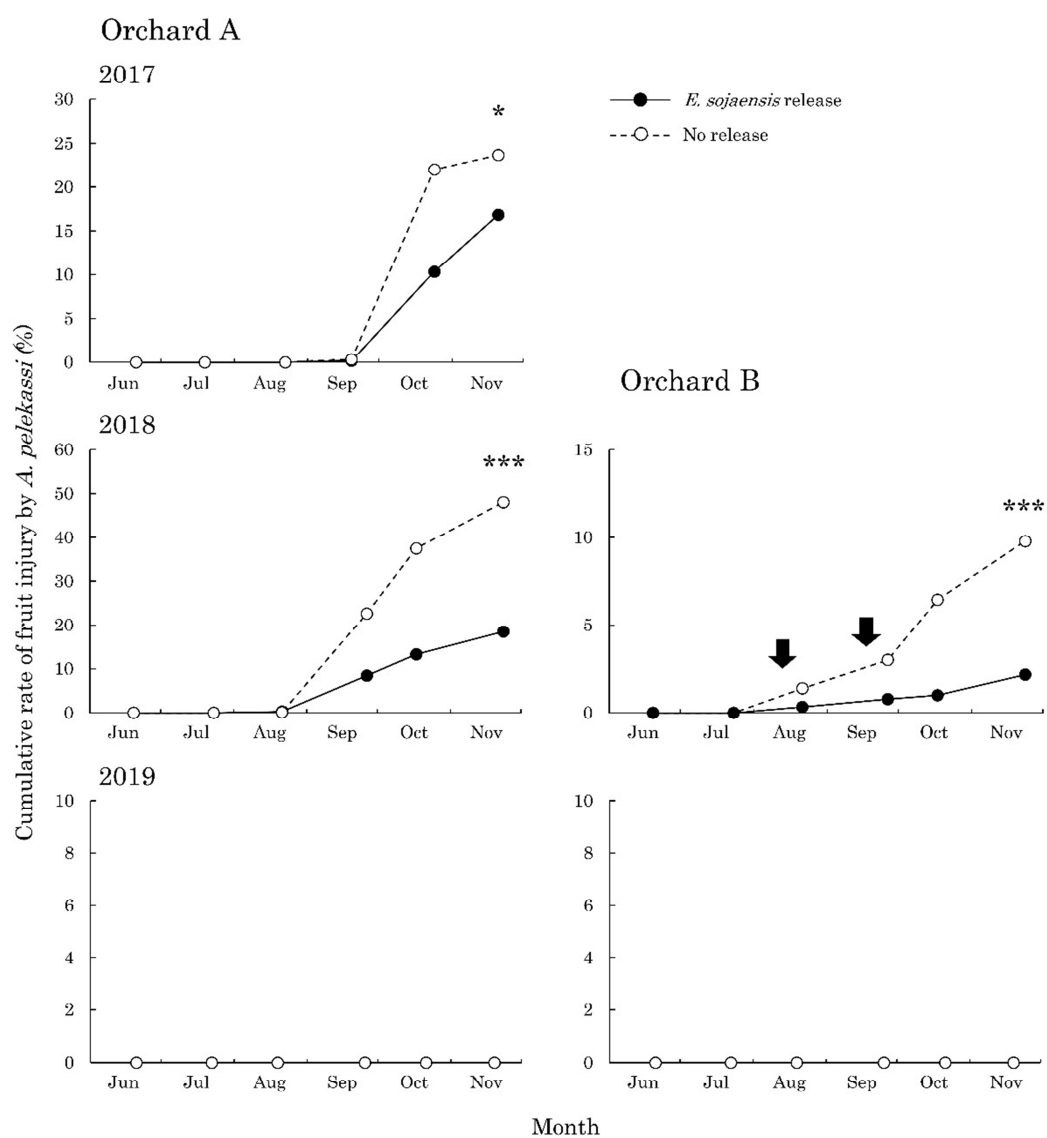


Fig. 7 Seasonal changes in the cumulative rate of fruit injury by *A. pelekassi* in two experimental orchards. Arrows indicate thinning of injured fruits. Asterisks indicate significant differences ($*P < 0.025$, $***P < 0.001$) by chi-squared test in November (using Bonferroni correction after logistic regression analysis in orchard A)

第3章 ニホンナシ園における広食性カブリダニによるニセナシサビダニおよびカンザワハダニの生物的防除

ニホンナシ（以下、ナシ）には14種の植食性ダニ（ハダニ科:9種、フシダニ科:3種、ホコリダニ科:2種）が寄生する（日本応用動物昆虫学会,2006）。このうち、経済的な被害が問題となる種は、フシダニ科の一種であるニセナシサビダニおよびハダニ科であるカンザワハダニやナミハダニである（中垣,1968; 内田,1982; 上遠野,1995; 高橋ら,2001; 山崎・糸山,2014）。

ニセナシサビダニは春から初夏かけて伸長する新梢の上位葉を主に加害し、6月下旬から7月上旬に寄生密度がピークとなる（上遠野,1995）。本害虫に多寄生された葉は光合成速度が低下し（福田,1989）、サビ症状が引き起こされるとともに湾曲して早期落葉する（上遠野,1995）。近年、ニセナシサビダニが媒介するナシ葉退緑斑点随伴ウイルス *pear chlorotic leaf spot-associated virus* (PCLSaV: Kubota et al., 2021) による退緑斑点症状（以下、モザイク症）が全国的な問題となっており（久保田,2020）、この症状が激しくなると新梢伸長初期から茎部の黒変や新葉の萎縮・壊疽がみられ、幼果の果梗の裂傷による果実肥大の不良が起こる（杉浦,2013）。ナシの栽培管理上、着果させる結果枝は前年の7月上旬頃までに伸長した新梢部であるため、充実した枝と花芽を確保して生産性を維持するには、本害虫を防除することが重要である。

ハダニ類は葉を主に加害し、葉やけ症状や早期落葉を引き起こす。また、本害虫の発生ピーク時の密度が高いほど果実の着色程度や糖度が低下する（内田,1982）ことから、高品質な果実を生産するためには本害虫の防除が必須である。ハダニ類は薬剤抵抗性を発達させやすいため世界的な難防除害虫と認識されており（刑部・上杉,2009）、ナシ園ではハダニ類の種や個体群、薬剤の散布前歴によって薬剤感受性の程度が異なることが明らかとなっている（中垣,1968; 山崎・糸山,2014）。

我が国のナシ栽培ではニセナシサビダニを対象に年間2回程度の殺ダニ剤が散布されている（伊澤,2000; 中井ら,2018; 清水ら,2019）が、本害虫が多発した場合には、さらに殺ダニ剤を追加散布する必要がある。このようなニセナシサビダニに対する薬剤の使用回数の増加は、本害虫の薬剤抵抗性を発達させる可能性がある。ま

た、ニセナシサビダニやハダニ類が多発する要因として、散布むらや薬剤感受性の低下、および主要病害虫の防除を目的とした非選択性薬剤の使用による土着天敵の排除などが指摘されている（伊澤,2001; Kishimoto, 2002）。これまでに、ナシの主要産地では土着天敵を活用したハダニ類の防除体系が確立されている（伊澤ら,2000; 荒川・岡崎,2002; 千葉県農林水産部,2020）が、ニセナシサビダニに登録のある薬剤の多くは土着天敵に対する影響が大きい（岸本ら,2018; 土田・増井,2019; 岸本ら,2020）。そのため、本害虫を薬剤により防除すると土着天敵が排除され、ハダニ類のリサージェンスを引き起こす可能性がある。以上のことから、薬剤抵抗性発達のリスクを低減し、かつ既存のIPMと矛盾なくニセナシサビダニとハダニ類の被害を防ぐためには、今後、土着天敵を利用してこれらダニ類の同時防除を可能にする新たな生物的防除が望まれる。

我が国のナシ園ではダニ類の有力な土着天敵として、ダニヒメ Tentou 類、ケシハネカクシ類、ハダニアザミウマ *Scolothrips takahashii* Priensner, ハダニタマバエの一種 *Fetiella* sp. といった捕食性昆虫や食性の異なる複数種のカブリダニ類が生息している（小池ら,2000; 高橋ら,2001; Kishimoto, 2002）。上述した捕食性昆虫はハダニ類を専門的に捕食するため（農山漁村文化協会,2016）、それ以外の害虫種に対する防除効果は期待できない。また、果樹園では、ハダニ類の狭食性捕食者の密度はハダニ類の密度上昇と同時にしくはやや遅れて上昇する（高橋ら,2001; Kishimoto, 2002; Funayama, 2015; Funayama et al., 2015; 山崎・糸山,2015）。このことから、狭食性捕食者はハダニ類の被害を未然に防ぐことが困難な場合がある。一方、Type IIIおよびType IVの広食性のカブリダニはハダニ類以外の微小害虫も捕食可能である（McMurtry, 1992; McMurtry and Croft, 1997; Messelink et al., 2010）。また、これら広食性カブリダニは害虫の低密度発生時から代替餌を利用してその個体群密度を維持することで、フシダニ類（第2章）やハダニ類（Osakabe et al., 1987; Messelink et al., 2010）を発生初期から低密度に抑制する。以上のことから、ニセナシサビダニとハダニ類を同時に防除するため

には、広食性カブリダニを害虫の低密度発生時からナシ樹上に定着・増殖させることが有効と考えられる。

広食性カブリダニを利用した防除体系を構築する上で、対象地域に発生する土着のカブリダニ種の種を把握する必要がある。そこで、第1節では、静岡県内の経済栽培ナシ園に発生するカブリダニ類の種類およびカンザワハダニの発生活消長を明らかにした。県内のナシ園で発生することが明らかとなった広食性カブリダニであるコウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニは、カンザワハダニが高密度時に形成する不規則立体網に絡まり、行動が制限される (Osakabe et al., 1987; Osakabe, 1988; 柿元ら, 2004)。このため、第2節では、カンザワハダニの低密度発生時から広食性カブリダニの密度を高めるために、代替餌が提供される条件下においてコウズケカブリダニもしくはニセラーゴカブリダニを放飼し、本害虫に対する発生抑制効果を実験温室内で検証した。最後に、第3節では、高い密度抑制効果が得られたコウズケカブリダニの実用性を評価するため、経済栽培ナシ園で本天敵の保護と放飼増強によるニセナシサビダニおよびカンザワハダニの生物的防除を確認した。

第1節 静岡県内のニホンナシ園に発生するカブリダニ種の解明

1. 緒言

我が国のナシ園における土着のカブリダニ類の種構成は、地域や栽培方法、使用される薬剤、発生する害虫種によって異なる (小池ら, 2000; Amano, 2001; Kishimoto, 2002; Ishii et al., 2018)。そこで、静岡県内の経済栽培ナシ園で土着広食性カブリダニを利用した生物的防除を検討するため、発生するカブリダニ類の種とハダニ類の発生活消長を明らかにした。

2. 材料および方法

島田市 (34.84°N, 138.23°E, ‘喜水’, ‘幸水’, ‘豊水’および‘あきづき’の混植, 面積約 15 a, 樹数約 120 本) および焼津市 (34.81°N, 138.26°E, ‘幸水’および‘豊水’の混植, 面積約 5 a, 樹数 25 本) の露地栽培ナシ園各 1 園地について、2018 年 4 月から 10 月上旬まで毎月 1 回から 2 回の頻度で調査した。各園地の任意の 10 樹 (樹齢 20 年から 30 年) を事前にマークし、各樹の任意の 40 葉 (果そう葉 30 葉 + 新梢葉 10 葉) についてカブリダニ類成虫およびハダニ類雌成虫を見取り調査した。カブリダニ類

は計数後 MA80 液 (Saito and Osakabe, 1992) に回収し、Hoyer 氏液にマウントしてプレパラート標本を作製した。このうち、雌成虫は位相差顕微鏡 (Olympus BX51) で外部および内部の形態から種を同定した (Toyoshima et al., 2013)。いずれの園地も一般管理および薬剤散布は生産者慣行とした。なお、下草管理は雑草の草生栽培であった。

3. 結果

静岡県内の経済栽培ナシ園におけるカブリダニ類とハダニ類の発生活消長を Fig. 8 に、カブリダニ類の種構成を Fig. 9 に示した。また、薬剤の散布履歴を Table 4 に示した。カブリダニ類は両園地ともに 5 月下旬から最終調査日である 10 月上旬まで確認された。捕獲されたカブリダニ類は Type I のチリカブリダニ *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot, Type II のミヤコカブリダニおよびケナガカブリダニ *Neoseiulus womersleyi* (Schicha), Type III のニセラーゴカブリダニ, Type IV のコウズケカブリダニの 5 種であった。いずれの園地でもハダニ類が発生し、島田市では 5 月下旬と 8 月上旬の 2 回ピークがみられたが、焼津市では 9 月上旬にピークがみられた。調査期間中に発生したハダニ類は主にカンザワハダニであった。チリカブリダニ、ミヤコカブリダニ、およびケナガカブリダニは 6 月以降のカンザワハダニが発生した際にそのコロニー内で多く確認された。ニセラーゴカブリダニは調査期間を通じて優占種であり、特に 8 月から 9 月にかけて多く捕獲された。コウズケカブリダニは 7 月以降の発生が少なかった。なお、カブリダニ類以外の天敵は、焼津市で 7 月下旬の調査時に数匹のハダニアザミウマが確認されたのみであった (データ省略)。

第2節 ニホンナシにおける広食性カブリダニによるハダニ類発生抑制効果

1. 緒言

静岡県の経済栽培ナシ園で発生する広食性カブリダニはコウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニの 2 種であることが明らかとなった (第1節)。しかし、これまでに、ナシのダニ類における広食性カブリダニの有効性は、トウヨウカブリダニ *Amblyseius orientalis* Ehara によるオウトウハダニ *Amphitetranynchus viennensis* (Zacher) の発生抑制効果が確認されているのみである (Kishimoto, 2002)。

広食性カブリダニはハダニ類の個体数が増加し始めるとその密度を抑制できないものの、ハダニ類の低密度発生時に個体数の増加を抑制しているとされる (McMurtry, 1992; Messelink et al., 2010). 餌となる害虫の低密度発生時から天敵の個体群密度を維持する方法のひとつとして代替餌の提供が挙げられ (Landis et al., 2000; Wade et al., 2008), 多くのカブリダニにとって花粉は最も主要な代替餌である (McMurtry and Croft, 1997). 増井・片山 (2019) は、クロマツの花粉を餌とした場合にコウズケカブリダニ、ニセラーゴカブリダニともに内的自然増加率が高く、この花粉が両種にとって好適な代替餌であることを明らかにした。そこで、カンザワハダニの低密度発生時からクロマツ花粉をナシ樹上に供給する条件下で、コウズケカブリダニもしくはニセラーゴカブリダニの放飼による本害虫の発生抑制効果および広食性カブリダニの排除が本害虫の密度に及ぼす影響を検証した。

2. 材料および方法

(1) 供試虫および花粉

本試験に供したコウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニは第1章と同じ系統である。この系統を累代飼育して用いた。

代替餌としてナシ樹上に散布した花粉は、2016年4月に静岡県農林技術研究所森林林業研究センター（浜松市浜北区根堅、35.85°N, 137.80°E）内のクロマツから花序ごと採集し、50°Cの恒温下に2日間静置して開葯させた後、250 μ m メッシュの篩に通過させたものを使用した。花粉は使用するまで20°Cで保管した。

(2) 試験区

本試験は2018年に実施した。風雨による天敵および害虫密度の低下を避けるため、静岡県農林技術研究所果樹研究センター（静岡市清水区茂畑）の無加温ガラス施設（間口15m×奥行14m×高さ5m）に定植されたナシ16樹（樹齢6年、‘幸水’8樹、‘静喜水’8樹、植栽間隔：樹間2.7m×列間3mから4m）を用い、害虫であるカンザワハダニが低密度の段階から、コウズケカブリダニを放飼する区、ニセラーゴカブリダニを放飼する区、天敵に影響の大きい殺虫剤を散布する天敵排除区、および無放飼区を設けた。これら4処理区を各品種につき1区1樹2反復として同一処理が隣接しないよう設置した。

本試験はカンザワハダニの自然発生条件下で実施し

た。コウズケカブリダニ放飼区およびニセラーゴカブリダニ放飼区では各種カブリダニの雌成虫を樹あたり30匹の密度で4月12日および5月9日の計2回放飼した。放飼には細筆を用い、産卵開始10日以内の雌成虫をリーフディスクから取り出し、任意の果そう葉上に接種した。天敵排除区では5月14日にフェンプロパトリン10.0%乳剤1,000倍液を、6月15日にピフェントリン7.2%フロアブル3,000倍液をそれぞれ各樹につき約1Lの水量で散布した。

害虫の低密度発生時の広食性カブリダニのナシ樹上への定着と増殖を促すため、4月12日、5月9日、5月24日、および6月7日の計4回、上述のクロマツの花粉を1,000倍に希釈した花粉溶液を各樹につき約500 mLの水量で全樹に散布した。

全ての試験樹の肥培管理は一般慣行としたが、枝葉は隣接する樹と互いに触れ合わないよう適宜剪定した。また、アブラムシ類が全ての処理区に発生したため、5月9日にチアメトキシサム10.0%顆粒水溶剤3,000倍液を各樹につき約1Lの水量で全樹に散布した。さらに、8月9日の調査時にハダニ類の多発を確認したため、同日にシエノピラフェン30.0%フロアブル2,000倍液を各樹につき約1Lの水量で全樹に散布した。なお、施設内は防草シートの被覆と手除草により常に清耕条件とした。

(3) 調査方法

4月から9月まで毎月1回から2回の頻度で各樹の任意の果そう葉30葉に生息するカブリダニ類成幼虫およびカンザワハダニ雌成虫数を全樹について計数した。カブリダニ類は第1節と同様の方法で計数後に回収し、種同定した。

(4) 統計解析

処理がナシ樹上に発生するカブリダニ類に及ぼす影響を評価するため、一般線形モデルにより解析した。5月から6月下旬（本試験におけるカンザワハダニの1回目の発生ピーク）および7月から8月上旬（本害虫の2回目の発生ピーク）までの30葉あたりの全てのカブリダニ類の累積捕獲数を応答変数とし、処理と期間およびこれらの交互作用を説明変数とした。交互作用が認められた場合は期間別に単純主効果検定を行い、TukeyのHSD検定により処理間の差を解析した。次に、処理がコウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニの発生個体数に及ぼす影響を評価するため、5月から6月下旬までの30葉あたりの各種雌成虫数を応答変数とし、処理を説明変数とする一般線形モデルにより解析した。有

意差が認められた場合はTukeyのHSD検定により種別に処理間の差を解析した。

処理がナシ樹上に発生するカンザワハダニに及ぼす影響を評価するため、一般線型モデルにより解析した。本害虫の1回目の発生ピークである6月下旬および2回目の発生ピークである8月上旬の30葉あたりの個体数を応答変数とし、処理と時期およびこれらの交互作用を説明変数とした。交互作用が認められた場合は時期別に単純主効果検定を行い、TukeyのHSD検定により処理間の差を解析した。

検定にはJMP version 12 (SAS Institute, 2015)を用いた。データを正規化するため、ダニ類の個体数はそれぞれ0.5を加算して対数変換 (Yamamura, 1999) した値を用いた。いずれの検定でも品種は説明変数に含めなかった。

3. 結果

4処理区 (コウズケカブリダニ放飼区、ニセラーゴカブリダニ放飼区、天敵排除区、および無放飼区) におけるカブリダニ類とカンザワハダニの個体数の推移をFig. 10に示した。カブリダニ類の累積捕獲数は処理の効果 ($F_{3,24}=2.711, P=0.07$) と期間の影響 ($F_{1,24}=1.09, P=0.31$) は認められなかったが、これらの交互作用には有意な差が検出された ($F_{3,24}=3.02, P=0.0497$)。単純主効果検定により期間別に処理間の差を解析した結果、5月から6月下旬までのカブリダニ類の累積捕獲数はコウズケカブリダニ放飼区が天敵排除区よりも有意に多かった (TukeyのHSD検定, $P<0.05$; Table 5)。一方、7月から8月上旬のカブリダニ類の累積捕獲数は処理間に有意な差は認められなかった (TukeyのHSD検定, $P>0.05$; Table 5)。各処理区における5月から6月下旬までのコウズケカブリダニとニセラーゴカブリダニの累積捕獲数 (Table 6) はともに処理の効果が認められた (コウズケカブリダニ: $F_{3,12}=27.62, P<0.0001$, ニセラーゴカブリダニ: $F_{3,12}=4.25, P=0.0291$)。コウズケカブリダニの累積捕獲数はコウズケカブリダニ放飼区が最も多く、次いで無放飼区が多かった (TukeyのHSD検定, $P<0.05$; Table 6)。ニセラーゴカブリダニの累積捕獲数はニセラーゴカブリダニ放飼区がコウズケカブリダニ放飼区よりも有意に多かった (TukeyのHSD検定, $P<0.05$; Table 6)。なお、調査期間を通してカブリダニ類以外の天敵は確認されなかった。

カンザワハダニの個体数は処理の効果 ($F_{3,24}=14.50$,

$P<0.0001$) および時期の影響 ($F_{1,24}=7.84, P=0.0099$) が認められ、これらの交互作用にも有意な差が検出された ($F_{3,24}=3.29, P=0.0378$)。単純主効果検定により時期別に処理間の差を解析した結果、6月下旬のカンザワハダニ個体数はコウズケカブリダニ放飼区および無放飼区がニセラーゴカブリダニ放飼区および天敵排除区よりも有意に少なかった (TukeyのHSD検定, $P<0.05$; Table 5)。一方、8月上旬のカンザワハダニ個体数は処理間に有意な差が認められず (TukeyのHSD検定, $P>0.05$; Table 5)、全ての区でカンザワハダニが多発した (Fig. 10)。

カブリダニ類の種構成の推移をFig. 11に示した。コウズケカブリダニ放飼区と無放飼区では6月下旬までコウズケカブリダニが優占種であったが、7月以降は本天敵の発生は少なかった。ニセラーゴカブリダニ放飼区と天敵排除区ではニセラーゴカブリダニが優占種であった。いずれの処理区でもカンザワハダニが多発した時期にはチリカブリダニやミヤコカブリダニの割合が高くなった。

第3節 経済栽培ニホンナシ園におけるコウズケカブリダニによるニセナシサビダニおよびカンザワハダニの生物的防除

1. 緒言

ナシ園ではニセナシサビダニの個体群密度の抑制にカブリダニ類が貢献していると推察されている (上遠野, 1995; Kishimoto, 2002)。これまでに、施設ナシ園に発生する複数種のカブリダニからニセナシサビダニのDNAが検出された事例がある (Ishii et al., 2018) もの、その防除効果は明らかにされていない。果樹園に発生する広食性カブリダニのうち、コウズケカブリダニは花粉等の代替餌を利用して個体数を増加させ、カンキツ類を加害するフシダニ類を防除できる (第2章)。ナシ樹上ではコウズケカブリダニの密度は春から初夏にかけて高まり (第1節, 第2節)、ニセナシサビダニの個体数増加 (上遠野ら, 1982) と同調する傾向がある。以上のことから、経済栽培園においてコウズケカブリダニを利用したニセナシサビダニの生物的防除の実現が期待される。

コウズケカブリダニをカンザワハダニの低密度発生時からナシ樹上で増加させることで、本害虫の発生を抑制できることが明らかとなった (第2節)。しかし、経済栽培ナシ園では、主要病害虫を防除するために非選択性

薬剤が高頻度で散布されている(第1節)。特に、コウズケカブリダニの個体数が増加する春から初夏にかけて非選択性薬剤を使用すると、本天敵が排除され、その結果、ダニ類のリサージェンスを引き起こす可能性がある(第2章; 第2節)。そこで、静岡県内の経済栽培ナシ園において、5月から6月下旬に使用される薬剤を選択性薬剤に変更してコウズケカブリダニを保護しつつ、本天敵を放飼することにより、ニセナシサビダニおよびカンザワハダニに対する防除効果を確認した。

2. 材料および方法

(1) 供試虫

本試験に供したコウズケカブリダニは第1章と同じ系統である。この系統を、ウェル細胞培養用プレートを用いた増殖法(Kishimoto, 2005)により、餌としてクロマツの花粉を3日から4日間隔で与えて増殖し、供試した。なお、花粉は2018年の4月上旬に静岡県農林技術研究所森林林業研究センター(浜松市浜北区根堅)に植栽されたクロマツから花序ごと採集し、50°Cの恒温条件で2日間開葯させた後、250 μ mメッシュの篩に通過させて-20°Cで保存したものを使用した。

(2) 試験園地および試験区

本試験は2019年に実施した。静岡県島田市(area I: 34.84°N, 138.23°E)および焼津市(area II: 34.81°N, 138.26°E)内の各1生産者が所有する複数の園地のうち、6月末まで選択性薬剤を利用してコウズケカブリダニを保護する経済栽培ナシ園をそれぞれ2園地設置した。試験区の配置をFig. 12に示した。島田市のA園およびB園はいずれの園地も面積約15a、'喜水'、'幸水'、'豊水'、および'あきづき'の混植であり、焼津市のC園は面積約5a、D園は面積約3a、いずれの園地も'幸水'および'豊水'の混植であった。A園およびB園ではそれぞれ'喜水'および'幸水'の各4樹を、C園およびD園ではそれぞれ'幸水'および'豊水'の各4樹を事前にマークし、コウズケカブリダニ放飼区(以下、放飼区)と無放飼区を互いの枝が重ならないよう1区1樹として各品種につき2反復設けた。調査樹は全て樹齢20年以上のものとした。なお、島田市のA園および焼津市のC園は第1節で調査した園と同一である。

本試験はニセナシサビダニの自然発生条件下で実施した。放飼区へのコウズケカブリダニの放飼は、飼育容器から卵が産下された毛糸を取り出して柵の番線と側枝の間に固定し、その後、主幹分岐部上で容器を裏面か

ら叩いて成幼虫を落下させるという方法で実施した。樹あたり約150匹の成幼虫+約200卵の密度で、4月19日、4月26日、5月8日、および5月30日の4回(合計約600匹+800卵/樹)放飼した。

各生産者の薬剤の散布履歴をTable 7に示した。5月から6月下旬に使用される薬剤はコウズケカブリダニに影響の小さいもの(土田・増井, 2019)とし、それ以外の薬剤散布および一般管理は生産者に一任した。

(3) ダニ類の調査

カブリダニ類およびハダニ類は4月下旬から11月上旬まで毎月2回の頻度で全ての調査樹について調査した。各樹の任意の30葉(果そう葉20葉+新梢葉10葉)の葉裏を調査してダニ類を計数した。カブリダニ類は第1節と同様の方法で計数後に回収し、種同定した。

ニセナシサビダニは4月下旬から新梢葉の伸長が停止する6月下旬まで毎月2回の頻度で全ての調査樹について調査した。各樹の展開間もない任意の新梢葉30葉をサンプリングして葉裏に寄生する成幼虫数を実体顕微鏡(Olympus SZX16)下で計数し、葉あたり個体数を算出した。

(4) 葉の被害調査

葉の被害は全ての調査樹について6月下旬に調査した。各樹の任意の30新梢について、上位の展開葉10葉を目視で確認し(300葉/樹)、実害のあるモザイク症状(発症部が葉面積の50%以上または葉の縮れや落葉)またはサビ症状(葉の縮れや奇形化、落葉)がみられる被害葉を計数し、各樹のモザイク症およびサビ症の被害率を算出した。

3. 統計解析

コウズケカブリダニの放飼がナシ樹上に発生するカブリダニ類の個体数、ニセナシサビダニの個体数、およびカンザワハダニの個体数に及ぼす影響を評価するため、線形混合モデルにより解析した。5月から6月中旬(発生ピーク)までのカブリダニ類の累積個体数、5月から6月下旬までのニセナシサビダニ累積個体数、5月から9月までのカンザワハダニ累積個体数をそれぞれ応答変数とし、処理、地域、これらの交互作用、地域にネストされた園地、および地域と園地にネストされた樹を説明変数とした。このうち、園地と樹を変量効果とし、誤差項を指定した。データを正規化するため、ダニ類の個体数はそれぞれ0.5を加算して対数変換(Yamamura, 1999)した値を用いた。

コウズケカブリダニの放飼がニセナシサビダニによるモザイク症およびサビ症の発生に及ぼす影響を評価するため、ロジスティック回帰分析により解析した。300葉あたりのモザイク症またはサビ症の被害葉数を応答変数とし、処理、地域、これらの交互作用、地域にネストされた園地、および地域と園地にネストされた樹を説明変数とした。データは二項分布を想定し、リンク関数はロジットに設定した。なお、第一種の過誤のリスクを軽減するため、過分散を調整した。

検定にはSAS OnDemand for Academics 2021 (SAS Institute, Cary, NC, USA) を用いた。いずれの検定でも品種の要因は説明変数に含めなかった。

4. 結果

ナシ樹上におけるカブリダニ類、ニセナシサビダニ、およびハダニ類の個体数の推移を Fig. 13 に示した。カブリダニ類の発生は全ての処理区で確認され、その個体数は6月にピークとなった。6月中旬までのカブリダニ類の累積個体数は放飼の効果が認められた ($F_{1,26} = 191.51, P < 0.001$) が、地域間差は認められず ($F_{1,2} = 18.40, P = 0.05$)、園地間差も認められなかった ($F_{2,26} = 0.58, P = 0.58$)。処理と地域の交互作用にも有意な差は検出されなかった ($F_{1,26} = 0.78, P = 0.39$)。放飼区におけるカブリダニ類の累積個体数は無放飼区の244%であった。捕獲されたカブリダニ類の種構成の推移を Fig. 14 に示した。全ての処理区で6月中旬まではコウズケカブリダニが、8月下旬以降はニセラーゴカブリダニが優占種であった。ハダニ類の狭食性捕食者であるチリカブリダニ、ミヤコカブリダニ、およびケナガカブリダニは主にカンザワハダニの密度が高くなった際に捕獲された。調査期間中にはカブリダニ類以外の天敵としてハダニタマバエ、ハダニアザミウマ、ヒメハナカメムシ類が確認されたが、その個体数はそれぞれ数匹のみであった (データ省略)。

ニセナシサビダニの累積個体数は放飼の効果が認められた ($F_{1,26} = 34.46, P < 0.0001$) が、地域間差は認められず ($F_{1,2} = 0.03, P = 0.87$)、園地間差も認められなかった ($F_{2,26} = 2.14, P = 0.14$)。処理と地域の交互作用にも有意な差は検出されなかった ($F_{1,26} = 0.63, P = 0.44$)。放飼区におけるニセナシサビダニの累積個体数は無放飼区の16%であった。

カンザワハダニの累積個体数は放飼の効果が認められた ($F_{1,26} = 18.21, P = 0.0002$) が、地域間差は認めら

れず ($F_{1,2} = 0.72, P = 0.48$)、園地間差も認められなかった ($F_{2,26} = 2.28, P = 0.12$)。処理と地域の交互作用にも有意な差は検出されなかった ($F_{1,26} = 0.14, P = 0.71$)。放飼区におけるカンザワハダニの累積個体数は無放飼区の34%であった。

各地域におけるモザイク症およびサビ症の被害葉率を Fig. 15 に示した。モザイク症の被害葉率は放飼の効果 ($\chi^2 = 12.82, df = 1, P = 0.0004$) と地域間差 ($\chi^2 = 18.92, df = 1, P < 0.0001$) が認められたが、これらの交互作用 ($\chi^2 = 0.21, df = 1, P = 0.65$) や園地間差 ($\chi^2 = 4.78, df = 2, P = 0.09$) は認められなかった。各園地における放飼区のモザイク症の被害葉率は無放飼区のそれよりも有意に低かった。サビ症の被害葉率は放飼の効果 ($\chi^2 = 23.75, df = 1, P < 0.0001$) と地域間差 ($\chi^2 = 8.75, df = 1, P = 0.0031$) が認められ、これらの交互作用も検出された ($\chi^2 = 4.52, df = 1, P = 0.033$)。園地間差は認められなかった ($\chi^2 = 5.00, df = 2, P = 0.08$)。全ての園地で放飼区のサビ症の被害葉率は無放飼区のそれよりも有意に低かった。

第4節 考察

全国のナシ産地でニセナシサビダニによるモザイク症や、複数の薬剤に対する感受性が低下したハダニ類による被害が多発しており (杉浦, 2013; 山崎・糸山, 2014; 千葉県農林水産部, 2020)、生産者は殺ダニ剤を多回数散布して防除している。このような薬剤の使用回数の増加は、ダニ類の新たな薬剤に対する抵抗性を発達させる可能性がある。そこで、ここでは、化学農薬のみに頼らない複数種のダニ類の防除方法として、土着の広食性カブリダニを利用した生物的防除について議論する。静岡県内の経済栽培ナシ園では5種のカブリダニ類が生息しており、このうち広食性カブリダニとしてコウズケカブリダニとニセラーゴカブリダニが認められた。これら2種広食性カブリダニは他の地域の露地栽培のナシ園でも共通して発生することが確認されている (小池ら, 2000; Amano, 2001; Kishimoto, 2002)。そこで、施設に植栽されたナシ樹を用いて両種のカンザワハダニに対する発生抑制効果を評価した結果、コウズケカブリダニのみが本害虫の発生を抑制可能であった。コウズケカブリダニはハダニ類だけでなく様々な種類のフシダニの防除に利用できる可能性がある (第2章) ため、経済栽培ナシ園において本天敵を利用したニセナシサビダニおよびカンザワハダニの同時防除を検証した。その結果、コ

ウズケカブリダニに影響の小さい薬剤を使用して本天敵を保護するとともに、本天敵を放飼増強することで、これら複数種のダニ類の同時防除が可能であることが明らかとなった。これまで、ニセナシカブリダニの防除に有効な天敵は明らかにされておらず、本害虫やその被害は化学農薬のみによって防除されてきた(伊澤, 2000; 中井ら, 2018; 清水ら, 2019)。したがって、本研究は、コウズケカブリダニがニセナシカブリダニの防除に有効な天敵であることを明らかにし、経済栽培園において本天敵の利用による複数種のダニ類の生物的防除の実現可能性を示した初めての報告である。

コウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニはカンザワハダニの個体数が増加し始めた場合には、本害虫が形成する不規則立体網に絡まり行動が制限されるため、その密度を抑制できない(Osakabe et al., 1987; Osakabe, 1988; 柿元ら, 2004)。一方、広食性カブリダニはハダニ類の低密度発生時に個体数の増加を抑制しているとされる(McMurtry, 1992; Messelink et al., 2010)。例えば、コウズケカブリダニはヤブガラシ *Cayratia japonica* (Thunb.) Gagnep. の真珠体を代替餌として利用することで、カンザワハダニが寄生する前に植物上に定着する結果、本害虫の発生を抑制できる(Ozawa and Yano, 2009)。また、害虫の低密度発生時における広食性カブリダニの代替餌として、花粉の利用が提案されている(Toyoshima et al., 2008; 園田ら, 2017; 第2章)。そこで、第2節ではカンザワハダニの低密度発生時から好適な代替餌であるクロマツ花粉がナシ樹上に人為的に提供される条件下で、コウズケカブリダニもしくはニセラーゴカブリダニを放飼し、本害虫に対する発生抑制効果を評価した。

コウズケカブリダニ放飼区では、6月下旬までのカブリダニ類の累積捕獲数は天敵排除区よりも多く、1回目のカンザワハダニの発生ピークは天敵排除区およびニセラーゴカブリダニ放飼区よりも低かった(Fig. 10, Table 5)。この期間はコウズケカブリダニ放飼区ではコウズケカブリダニが優占種であり(Fig. 11a)、その個体数は他の処理区と比較して有意に多かった(Table 6)。一方、ニセラーゴカブリダニ放飼区では、6月下旬まではニセラーゴカブリダニが優占種であり(Fig. 11b)、その個体数はコウズケカブリダニ放飼区と比較して多かったものの、無放飼区や天敵排除区との有意な差はなく(Table 6)、1回目のカンザワハダニの発生ピークは高かった(Fig. 10b)。これらの結果から、カンザワハダニ

の低密度発生時から花粉が提供される条件下において、コウズケカブリダニを保護および放飼増強することにより本天敵の個体群密度が高まる結果、本害虫の発生を抑制できることが示された。ニセラーゴカブリダニ放飼区でカンザワハダニの発生を抑制できなかったのは、ニセラーゴカブリダニ雌成虫は他種カブリダニよりも同種の卵や幼虫を好んで捕食する可能性がある(Ji et al., 2015)ことから、代替餌を提供しても共食いが頻繁に起こり、その個体群密度を高められなかったことが原因のひとつと考えられる。なお、この点については第4章で詳細に検証する。

7月以降は無放飼区だけでなくコウズケカブリダニ放飼区でもコウズケカブリダニの密度が低く、8月上旬には全ての処理区でカンザワハダニが多発した(Fig. 10)。コウズケカブリダニは非選択性薬剤の使用の有無にかかわらず7月下旬以降の発生が少なく(Fig. 9, 11)、8月から9月にハダニ類の密度が上昇する傾向があり(Fig. 8, 10)、ナシ園でのこのような広食性カブリダニとハダニ類の発消長はKishimoto (2002)でも確認されている。また、他の果樹や樹木でもコウズケカブリダニは6月に発生のピークとなるが、7月以降は急激に密度が低下する(Kasai et al., 2002; 柴尾ら, 2006; 増井・片山, 2017; 第2章)。これらのことから、栽培期間を通してハダニ類を常に低密度に管理するためには、今後、夏季のコウズケカブリダニの密度低下要因を解明した上で、ナシ樹上における本天敵の個体群の維持・増殖技術を検討する必要がある。

果樹園では使用する薬剤の違いによって発生するカブリダニ類の種やハダニ類の密度が異なることが知られており、非選択性の殺虫剤を多用した場合は広食性カブリダニの発生が少なくハダニ類が多発するが、選択性の殺虫剤を利用した場合は複数種の広食性カブリダニが発生してハダニ類を低密度に抑制する(Amano, 2001; Kishimoto, 2002; Funayama, 2015; Funayama et al., 2015)。本研究でも、6月下旬までは、合成ピレスロイド系殺虫剤を散布した天敵排除区では広食性カブリダニの発生は少なくカンザワハダニが多発したが(Fig. 10c, 11c)、無放飼区では天敵排除区と比較してコウズケカブリダニの発生が多く(Table 6)、本害虫は低密度に維持された(Fig. 10d, Table 5)。このことから、静岡県のナシ園においても、春から初夏の非選択性殺虫剤の散布はコウズケカブリダニを排除し、カンザワハダニのリサージェンスを引き起こす可能性がある。実際に、第1節で

調査した経済栽培園でも、6月下旬までに重要害虫であるチャバネアオカメムシ *Plautia crossota stali* Scott やナシヒメシンクイ *Grapholita molesta* (Busck), 重要病害であるナシ黒星病 (病原菌: *Venturia nashicola* Tanaka et Yamamoto) やナシ黒斑病 (病原菌: *Alternaria alternata* (Fries) Keissler) などを対象に広食性カブリダニに影響のある薬剤 (岸本ら, 2018; 土田・増井, 2019; 岸本ら, 2020) が散布されており (Table 4), コウズケカブリダニの占める割合は特に低かった (Fig. 9). 以上のことから, 経済栽培園でコウズケカブリダニによるハダニ類の発生抑制効果を得るためには, 本天敵に影響の小さい薬剤を利用した防除体系を構築する必要がある。

天敵の保護と複数の病害虫防除を両立するためには, 選択性薬剤の使用や化学農薬と天敵の利用時期を一時的に分ける必要がある (Ruberson et al., 1998). 果樹園では, コウズケカブリダニは春から初夏にかけて花粉等を餌として増殖することから, この時期の主要病害虫を防除するために使用される化学農薬を非選択性薬剤から選択性薬剤に変更して本天敵を保護することで, 本天敵のフシダニ類に対する防除効果が発揮される (第2章). 本研究により, コウズケカブリダニはナシ樹上でも害虫の密度が低い春から初夏にかけて個体数を増加させ, カンザワハダニの発生を抑制する (第2節) ことが明らかとなったため, 本天敵を利用することでニセナシサビダニおよびカンザワハダニを同時に防除できると考えられた. そこで, 第3節では, 経済栽培ナシ園において, 4月下旬から6月下旬までコウズケカブリダニに影響の小さい薬剤を使用して本天敵を保護するとともに, 本天敵の接種的放飼による複数種のダニ類の防除効果を検討した. その結果, コウズケカブリダニを接種的に放飼すると, 無放飼区よりもカブリダニ類の個体数は多くなり, 逆にニセナシサビダニおよびカンザワハダニの個体数は少なかった. また, コウズケカブリダニ放飼区では無放飼区と比較してモザイク症およびサビ症の被害葉率は低かった. 以上のことから, 経済栽培ナシ園においても, 選択性薬剤を利用することでコウズケカブリダニが保護され, さらに, 本天敵を放飼増強することでニセナシサビダニおよびカンザワハダニを同時に防除可能であることが明らかとなった。

コウズケカブリダニは多くのフシダニ個体を捕食し (Kondo and Hiramatsu, 1999a), 野外では自然に供給される花粉等を餌として増殖するため, 餌としての質に

よらずフシダニ類の個体数を抑制することが可能である (第2章). したがって, 調査した園地は周辺植生から風媒花粉等の代替餌が供給される条件であり, かつコウズケカブリダニ放飼区では本天敵が放飼増強されて6月上旬に高密度に発生した結果, 多数のニセナシサビダニが捕食され, 本害虫の密度がその要防除水準である葉あたり50匹 (伊澤, 2000) よりも低くなった (Fig. 13) と考えられる. さらに, ニセナシサビダニは5月中下旬から急激に密度が高まり, 6月下旬から7月上旬に発生のピークとなって新梢葉に被害を引き起こす (上遠野ら, 1982) ことから, コウズケカブリダニ放飼区では本害虫の初期密度が抑制された結果, 無放飼区よりもモザイク症およびサビ症の被害葉率が低く抑制された (Fig. 15) と推察される. これらのことは, 本天敵を利用することで, 生産者はニセナシサビダニを対象とした殺ダニ剤の散布を削減できることを示唆している. ただし, 無放飼区ではコウズケカブリダニが発生したにもかかわらず, ニセナシサビダニの密度を要防除水準以下に抑制できなかった (Fig. 13). 以上のことから, 実用的なニセナシサビダニの生物防除のためには, 土着のコウズケカブリダニ個体群の保護とともに, 放飼増強など本天敵の初期密度を高めるための技術を組み合わせる必要がある. さらに, ニセナシサビダニの被害は品種によって異なる (上遠野, 1995) ことから, 今後は多様な品種においてコウズケカブリダニの有効性を検証する必要がある。

コウズケカブリダニは様々な果樹園で6月に発生のピークを示す (Kondo and Hiramatsu, 1999b; Shibao et al., 2004; 柴尾ら, 2006; 増井・片山, 2017; 第2章) ため, 初夏の非選択性薬剤の散布は本天敵を排除し, 害虫のリサージェンスを引き起こす可能性がある. 例えば, モモ園では春から初夏の合成ピレスロイド系殺虫剤の散布により土着のコウズケカブリダニとニセレーゴカブリダニが排除され, モモサビダニのリサージェンスが引き起こされる (Kondo and Hiramatsu, 1999b). さらに, カンキツ園では6月上旬のカンキツ黒点病防除のためのジチオカーバメート系薬剤の散布がコウズケカブリダニに悪影響を与え, 本系統の薬剤に対して感受性を低下させたミカンサビダニのリサージェンスを引き起こす (第2章). 本研究でも, 選択性薬剤を用いた2019年は全ての園地でコウズケカブリダニが多数捕獲された (Fig. 14, 15) が, 非選択性薬剤を用いた2018年は本天敵の密度は低かった (Fig. 8, 9). したがって, ナシ園でも非選択性薬剤を多用する防除が行われた場合には,

コウズケカブリダニが排除され、ニセナシサビダニのリサージェンスを引き起こす可能性がある。

カンザワハダニの発生前からナシ樹上にコウズケカブリダニが定着している条件では、本害虫の発生を抑制できることが明らかとなった(第2節)。このことは経済栽培園でも確認され、調査期間を通してコウズケカブリダニ放飼区のカンザワハダニの密度は無放飼区のそれよりも低く抑制した(Fig. 13)。リンゴ *Malus pumila* Mill. 園では広食性カブリダニがリンゴサビダニ *Aculus schlechtendali* (Nalepa) を代替餌として個体群密度を維持し、その後に発生するハダニ類を低密度に抑制する(Hoyt, 1969; 舟山・高橋, 1993; Toyoshima et al., 2011)。これと同様に、ナシ園でもコウズケカブリダニがニセナシサビダニを代替餌として個体群密度を維持した結果、カンザワハダニの初期密度を抑制できた可能性がある。今後、コウズケカブリダニを利用した複数種の害虫の防除を確立する上で、本天敵の代替餌としてのニセナシサビダニの機能を評価する必要がある。

ニセナシサビダニの加害によるモザイク症およびサビ症の被害葉率は地域によって異なり、島田市の園地は焼津市の園地よりもこれらの被害葉率が低かった(Fig. 15)。この理由のひとつとして、園地周辺の植生がコウズケカブリダニによる害虫防除効果に影響を及ぼした可能性がある。島田市の園地は水田やその畦畔に繁茂するイネ科雑草に囲まれていたが、焼津市の園地は高速道路や住宅に囲まれており、前者は後者よりも飛散するイネ科の花粉の量が多かったと考えられる。*Euseius* 属カブリダニは花粉の狭食性摂食者という性質も持つため(McMurtry and Croft, 1997)、花粉の供給はその個体群密度を維持する上で非常に有効である(Duso et al., 2004; Ghasemzadeh et al., 2017; 第2章)。オーストラリアでは *Euseius victoriensis* (Womersley) が、イスラエルでは *E. scutalis* や *E. stipulatus* がカンキツ園内外に植栽されるローズガラスの風媒花粉を摂食して個体数を増加させ、特に後者2種はカンキツ類を加害するフシダニ科の一種である *P. oleivora* の密度を抑制することが確認されている(Smith and Papacek, 1991; Maoz et al., 2014; Warburg et al., 2018)。我が国の果樹園においても、コウズケカブリダニがメヒシバ *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler の風媒花粉を摂食することが確認されている(Wari et al., 2016)。さらに、花粉の提供はコウズケカブリダニの密度を高めることから、フシダニ類(第2章)やハダニ類(Osakabe et al., 1987)に対する密度

抑制効果を強化する。以上のことから、島田市の園地では、周辺植生から供給されるイネ科の風媒花粉がコウズケカブリダニによる害虫防除効果を強化した結果、焼津市の園地よりもニセナシサビダニの被害が抑制された可能性がある。ただし、カブリダニ類やニセナシサビダニの個体数に地域間差は認められなかったことから、今後は周辺植生が土着天敵および害虫の個体群動態に及ぼす影響を詳細に検証する必要がある。

結論として、土着天敵によるニセナシサビダニおよびカンザワハダニの生物防除は、害虫の低密度発生時から花粉等の代替餌が存在する条件下でコウズケカブリダニを利用することが有効であり、経済栽培園では春から初夏にかけて本天敵を保護および放飼増強することで実現できる。ただし、コウズケカブリダニのニセナシサビダニに対する防除効果は地域によって異なる可能性がある。今後は、園地内外の植生およびそこから供給される花粉等の代替餌がコウズケカブリダニの個体群動態に及ぼす影響を解明した上で、本天敵の害虫防除効果を強化するための生息地管理(habitat management; Landis et al., 2000)を検討する必要がある。

最後に、本章における全ての試験で確認されたチリカブリダニ、ミヤコカブリダニ、およびケナガカブリダニは *Tetranychus* 属ハダニの狭食性捕食者であり(McMurtry and Croft, 1997)、ハダニ類が食害した葉を選好する(Sabelis and Van de Baan, 1983; Maeda et al., 1999; Maeda and Takabayashi, 2001; Shimoda et al., 2005)。このことから、これらカブリダニ類はハダニ類が食害する葉に定着してコロニー内で増殖したため、本害虫の多発時に捕獲された割合が高くなったと考えられる。このうち、チリカブリダニの分布は地中海沿岸および北アフリカやチリの地中海性気候に限られている(Takahashi and Chant, 1993)。また、本種は休眠性を持たないため、我が国では亜熱帯気候の地方以外では土着化できないと考えられていた(森ら, 1993)。しかし、2009年には静岡県の一部のチャ *Camellia siensis* (L.) O. Kuntze 園でチリカブリダニの生息が確認された後(Ozawa et al., 2010)、その分布は拡大しており、現在では本県のチャ園に広く定着していると推測されている(小澤・内山, 2019)。2014年には神奈川県のアナナス園でもチリカブリダニの生息が確認されている(山崎・糸山, 2015)ことから、静岡県のナシ園でも本種が定着している可能性が高い。今後は、ナシ樹上および園内外におけるチリカブリダニの生活環を明らかにするととも

に、ハダニ類の密度および被害の抑制にどの程度貢献しているかを評価する必要がある。

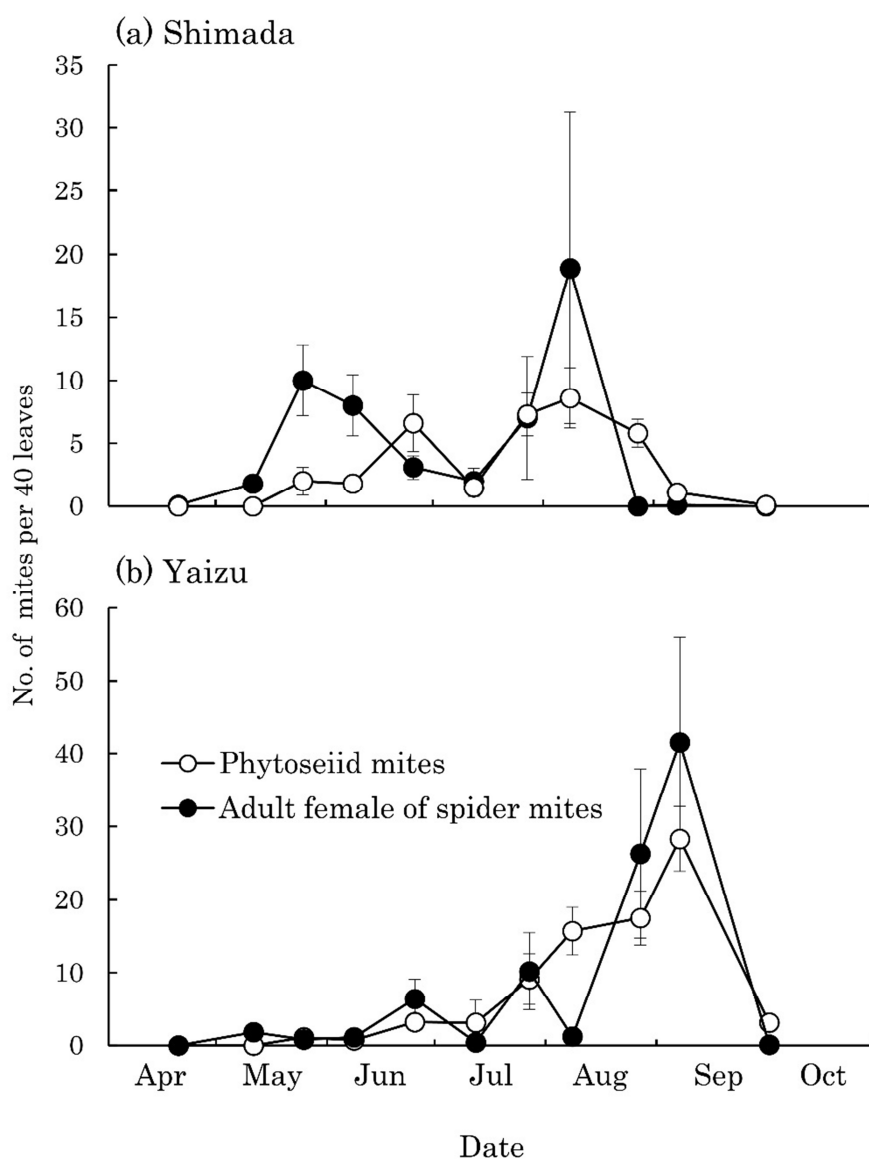


Fig. 8 Mean number of phytoseiid mites and spider mites per 40 leaves in two commercial Japanese pear orchards in Shizuoka Prefecture in 2018: (a) Shimada and (b) Yaizu. Error bars indicate SE

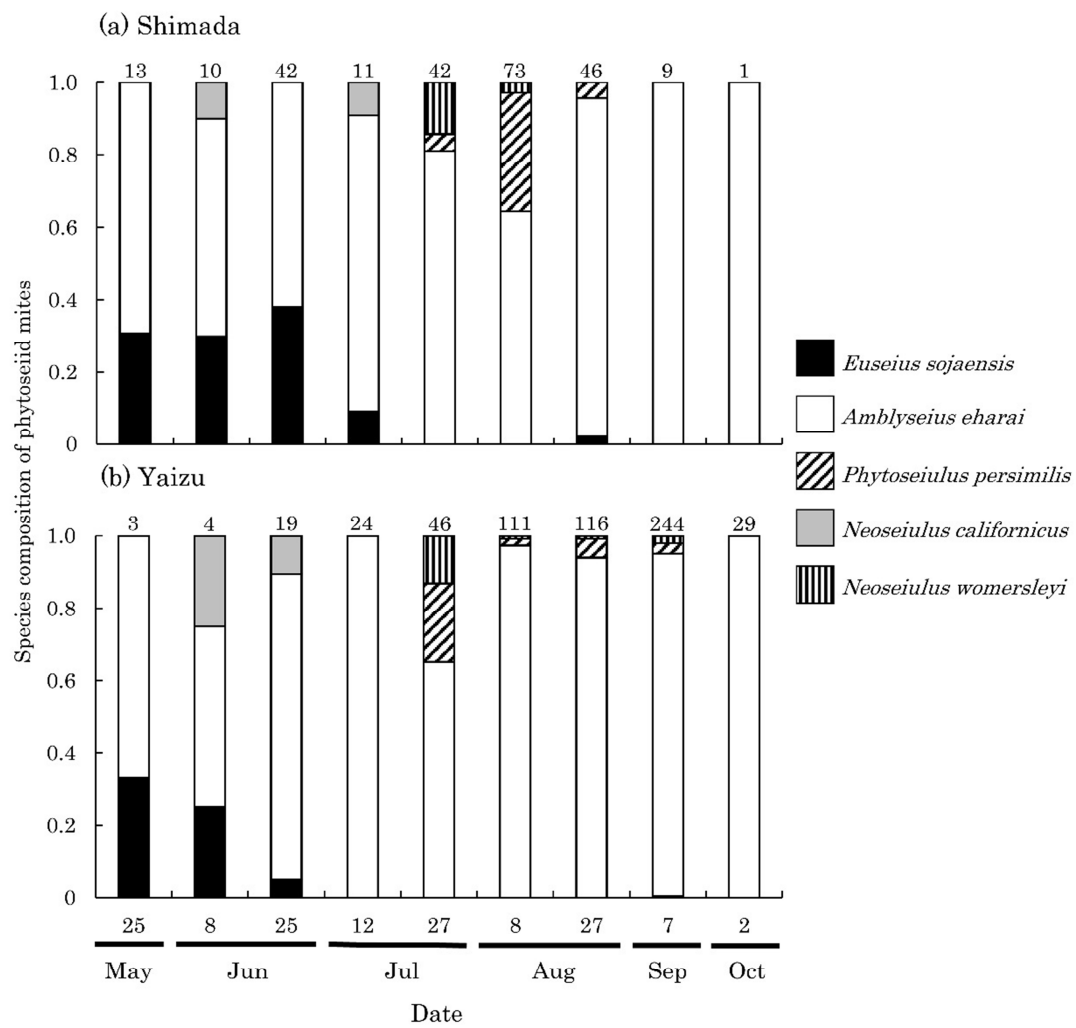


Fig. 9 Species composition of phytoseiid mites captured in two commercial Japanese pear orchards in Shizuoka Prefecture in 2018: (a) Shimada and (b) Yaizu. Numbers on bars indicate the number of identified adult females

Table 4 Pesticide^a use histories in two Japanese pear orchards during investigation

Time of application	Shimada	Yaizu
Early April	TMTD 40.0% FL ^b (500) ^c	Mandestrobin 40.0% FL (2,000)
Mid- April	Difenoconazole 10.0% WDG (2,000) Alanycarb 40.0% WP (1,000) Dithianon 42.0% FL (1,000) Acetamiprid 20.0% SP (2,000)	Alanycarb 40.0% WP (1,000) Imidacloprid 50.0% WDG (5,000)
Early May	Pyribencarb 40.0% WDG (2,000) CYAP 40.0% WP (1,000) Polyoxin-complex 10.0% WP (1,000) Dinotefuran 20.0% SG (2,000)	Thiophanate-methyl 70.0% WP (1,000) Clothianidin 16.0% SP (2,000)
Mid-May	Mixture of captan 20.0% & oxine-copper 30.0% WP (500) PAP 50.0% WP (1,000)	Mixture of pyraclostrobin 6.8% & boscalid 13.6% WDG (2,000) Dinotefuran 20.0% SG (2,000)
Late May	Iminoctadine-albesilate 40.0% WP (1,000) Chlorfenapyr 10.0% FL (2,000)	Iminoctadine-albesilate 40.0% WP (1,000)
Early June	Fluazinam 39.5% SC (2,000) DMTP 36.0% WP (1,500)	Iminoctadine-albesilate 40.0% WP (1,000) Bifenthrin 2.0% WP (1,000)
Mid-June	Polyoxin-complex 10.0% WP (1,000) Thiacloprid 20.0% WDG (2,000)	
Late June	Cyprodinil 50.0% WDG (2,000) Imidacloprid 20.0% FL (5,000)	Thiophanate-methyl 70.0% WP (1,000) Milbemectin 1.0% WP (2,000)
Early July	Mixture of pyraclostrobin 6.8% & boscalid 13.6% WDG (2,000) Thiamethoxam 10.0% SG (2,000) Mixture of tebuconazole 17.7% & fluopyram 17.7% FL (3,000) Bifenthrin 2.0% WP (1,000)	Kresoxim-methyl 50.0% DF (2,000)
Mid-July	Acetamiprid 20.0% SP (2,000) Cyantraniliprole 10.2% SE (2,000)	Bifenazate 20.0% FL (1,000)
Late July		Thiophanate-methyl 70.0% WP (1,000) Clothianidin 16.0% SP (2,000)
Early August	Acequinocyl 15.0% FL (1,000) Cypermethrin 6.0% WP (1,000)	Dinotefuran 20.0% SG (2,000)
Mid-August		Acequinocyl 15.0% FL (1,000) Cypermethrin 6.0% WP (1,000)
Late August	Fenpropathrin 10.0 % WP (1,000) Pyflubumide 20.0% FL (2,000)	
Early September	Thiophanate-methyl 70.0% WP (1,000) Permethrin 10.0% FL (1,500)	
Early October	Dithianon 42.0% FL (1,000) CYAP 40.0% WP (1,000)	Iminoctadine-albesilate 40.0% WP (1,000) Dinotefuran 20.0% SG (2,000)

^a Fungicides and insecticides^b DF: dry flowable, EC: emulsion concentrate, FL: flowable, SC: suspension concentrate, SE: suspo emulsion, SG: water soluble granules, SP: water soluble powder, WDG: water dispersible granules, WP: wettable powder^c Numbers in parentheses indicate dilution rate

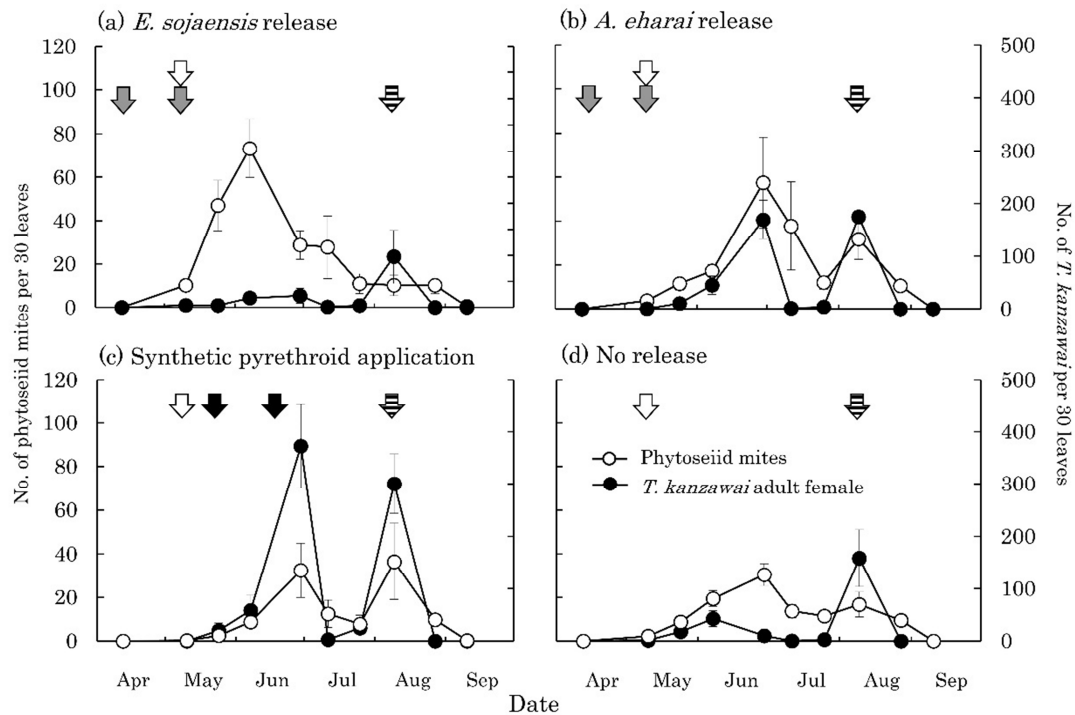


Fig. 10 Mean number of phytoseiid mites and *Tetranychus kanzawai* per 30 leaves in four treatments in a Japanese pear greenhouse in 2018: (a) *Euseius sojaensis* release, (b) *Amblyseius eharai* release, (c) synthetic pyrethroid application and (d) no-release. Gray arrows indicate the release of 30 adult phytoseiid females per tree. White, black and striped arrows indicate application of a neonicotinoid, synthetic pyrethroid and acaricide, respectively. Pine pollen was provided as alternative food for predatory mites in all treatments at 12 April, 9 May, 24 May and 7 June. Error bars indicate SE. See Fig. 11 for species composition of phytoseiids

Table 5 Cumulative number of phytoseiid mites and the number of *T. kanzawai* per 30 leaves in each treatment

Treatment	Phytoseiid mites (mean $\pm$ SE)		<i>T. kanzawai</i> (mean $\pm$ SE)	
	May to late June	July to early August	Late June	Early August
<i>E. sojaensis</i> release	159.3 $\pm$ 27.9 a	59.3 $\pm$ 18.4 a	22.5 $\pm$ 14.0 a	97.3 $\pm$ 51.2 a
<i>A. eharai</i> release	90.0 $\pm$ 24.3 ab	92.0 $\pm$ 18.3 a	169.8 $\pm$ 36.8 b	175.0 $\pm$ 12.1 a
Synthetic pyrethroid application	44.0 $\pm$ 12.9 b	66.5 $\pm$ 19.0 a	372.3 $\pm$ 80.8 b	300.3 $\pm$ 56.9 a
No release	61.0 $\pm$ 7.2 ab	51.5 $\pm$ 7.6 a	10.25 $\pm$ 3.5 a	158.5 $\pm$ 54.4 a

Values with the same letter within each column are not significantly different by Tukey's HSD test, $P > 0.05$

Table 6 Cumulative number of adult female of two generalist phytoseiid species per 30 leaves from May to late June

Treatment	Phytoseiid species (mean $\pm$ SE)	
	<i>E. sojaensis</i>	<i>A. eharai</i>
<i>E. sojaensis</i> release	84.3 $\pm$ 27.9 a	3.3 $\pm$ 13.6 b
<i>A. eharai</i> release	2.3 $\pm$ 24.3 c	20.5 $\pm$ 1.1 a
Synthetic pyrethroid application	1.0 $\pm$ 12.9 c	5.3 $\pm$ 0.7 ab
No release	11.5 $\pm$ 7.2 b	7.5 $\pm$ 1.6 ab

Values with the same letter within each column are not significantly different by Tukey's HSD test, $P > 0.05$

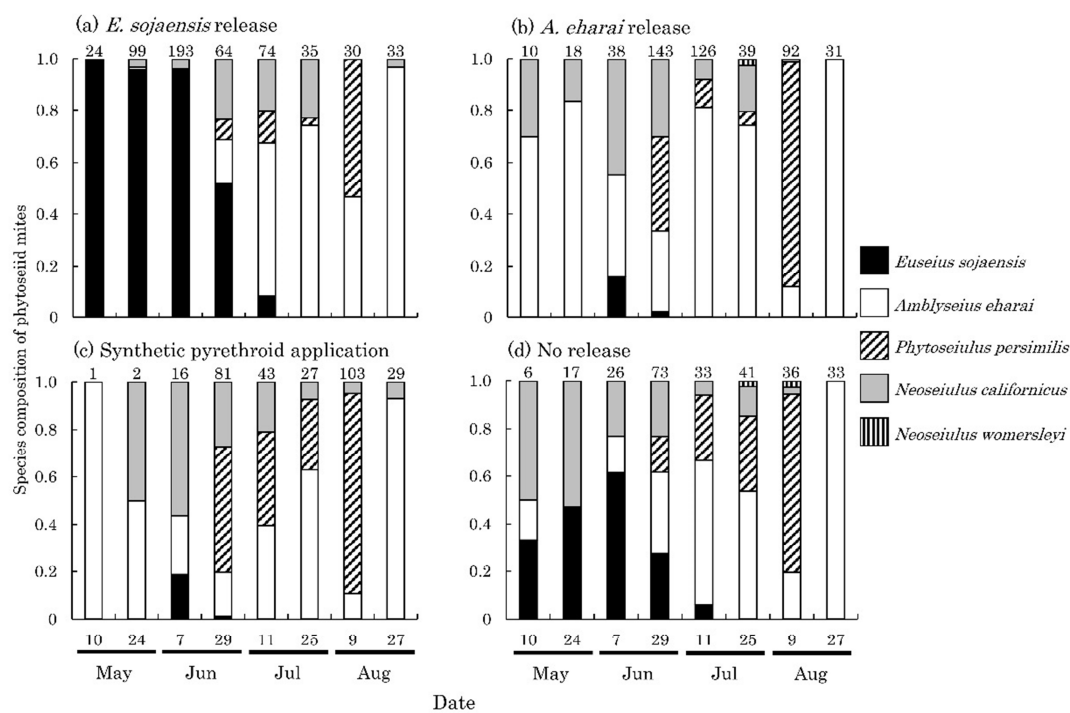
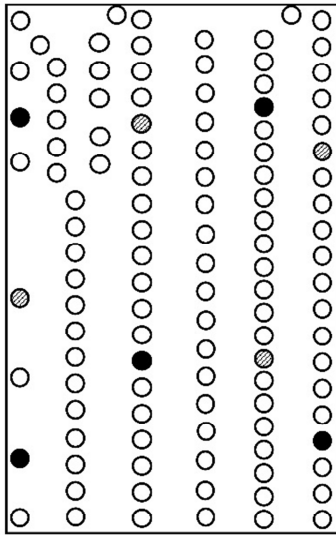


Fig. 11 Species composition of phytoseiid mites captured from four treatments in a Japanese pear greenhouse in 2018: (a) *E. sojaensis* release, (b) *A. eharai* release, (c) synthetic pyrethroid application and (d) no-release. Numbers on bars indicate the number of identified adult females

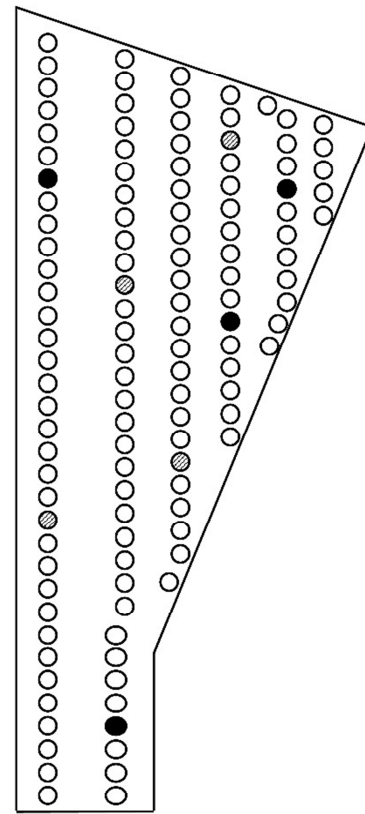
Area I

(A)

- *Euseius sojaensis* release
- No release

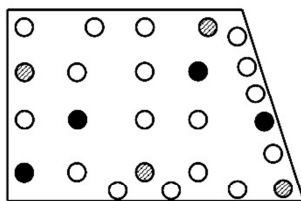


(B)



Area II

(C)



(D)

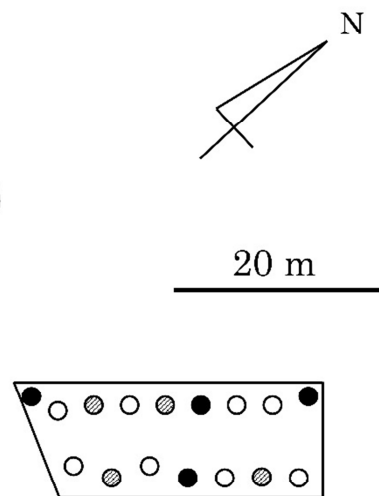


Fig. 12 Locations of the Japanese pear trees in experimental orchards in area I (Shimada City: A, B) and area II (Yaizu City: C, D). The distance between areas I and II is about 4 km, that between orchards A and B is about 100 m, and that between orchards C and D is about 20 m

Table 7 Pesticide use histories in two experimental Japanese pear orchards

Time of application	Area I (orchards A and B)	Area II (orchards C and D)
Late March	Oxpoconazole fumarate 20.0% WP ^a (2,000) ^b	Dithianon 42.0% FL (1,000)
Early April	Flonicamid 10.0% DF (2,000)	Alanycarb 40.0% WP (1,000) ^c
	Thiram 40.0% FL (500)	Mandestrobin 40.0% FL (2,000)
Mid-April	Pymetrozine 50.0% WP (5,000)	Difenoconazole 10.0% WDG (2,000)
	Thiram 40.0% FL (500)	Clothianidin 16.0% SP (2,000)
	CYAP 40.0% WP (1,000) ^c	
	Difenoconazole 10.0% WDG (2,000)	
Late April	Thiamethoxam 10.0% SG (2,000)	Dinotefuran 20.0% SG (2,000)
	Dithianon 42.0% FL (1,000)	Thiram 40.0% FL (500)
Early May		Sulfoxaflor 9.5% FL (2,000)
		Iminoctadine-albesilate 40.0% WP (1,000)
Mid-May	Buprofezin 20.0% FL (1,000)	Thiamethoxam 10.0% SG (2,000)
	Thiram 40.0% FL (500)	Cyprodinil 50.0% WDG (2,000)
	Dinotefuran 20.0% SG (2,000)	
	Captan 80.0% WP (1,000)	
Late May	Cyantraniliprole 10.2% SE (5,000)	Pyrifluquinazon 20.0% WDG (3,000)
	Iminoctadine-albesilate 40.0% WP (1,000)	Penthiopyrad 15.0% FL (1,500)
Early June	Sulfoxaflor 9.5% FL (2,000)	Cyclaniliprole 4.5% L (2,000)
	Cyprodinil 50.0% WDG (2,000)	Iminoctadine-albesilate 40.0% WP (1,000)
Mid-June	Thiacloprid 20.0% WDG (2,000)	Imidacloprid 50.0% WDG (5,000)
	Iminoctadine-albesilate 40.0% WP (1,000)	Tebuconazole 20.0% FL (2,000)
Late June	Thiamethoxam 10.0% SG (2,000)	Thiamethoxam 10.0% SG (2,000)
	Iprodione 50.0% WP (1,000)	Kresoxim-methyl 50.0% DF (2,000)
Early July	Cyclaniliprole 4.5% (2,000)	
	Mixture of pyraclostrobin 6.8% and boscalid 13.6% WDG (2,000)	
Mid-July	Imidacloprid 20.0% FL (5,000)	Chlorfenapyr 10.0% FL (2,000)
	Mixture of tebuconazole 17.7% and fluopyram 17.7% FL (2,000)	Thiophanate-methyl 70.0% WP (1,000) ^c
Late July	Bifenthrin 2.0% WP (1,000) ^c	Cypermethrin 6.0% WP (1,000) ^c
	Azoxystrobin 10.0% FL (1,000)	Bifenazate 20.0% FL (1,000)
Mid-August	Cypermethrin 6.0% WP (1,000) ^c	Cyclaniliprole 4.5% (2,000)
	Milbemectin 1.0% WP (2,000) ^c	Dinotefuran 20.0% SG (2,000)
	Thiophanate-methyl 70.0% WP (1,000) ^c	
Late August	Clothianidin 16.0% SP (2,000)	Clothianidin 16.0% SP (2,000)
Early September		Dinotefuran 20.0% SG (2,000)
Late September	Dinotefuran 20.0% SG (2,000)	Oxine-copper 35.0% FL (1,000)
	Iminoctadine-albesilate 40.0% WP (1,000)	

^a DF: dry flowable, EC: emulsion concentrate, FL: flowable, L: liquid formulation, SC: suspension concentrate, SE: suspension emulsion, SG: water soluble granules, SP: water soluble powder, WDG: water dispersible granules, WP: wettable powder

^b Numbers in parentheses indicate dilution rate

^c Harmful pesticide to *Euseius sojaensis* (Tsuchida and Masui, 2019)

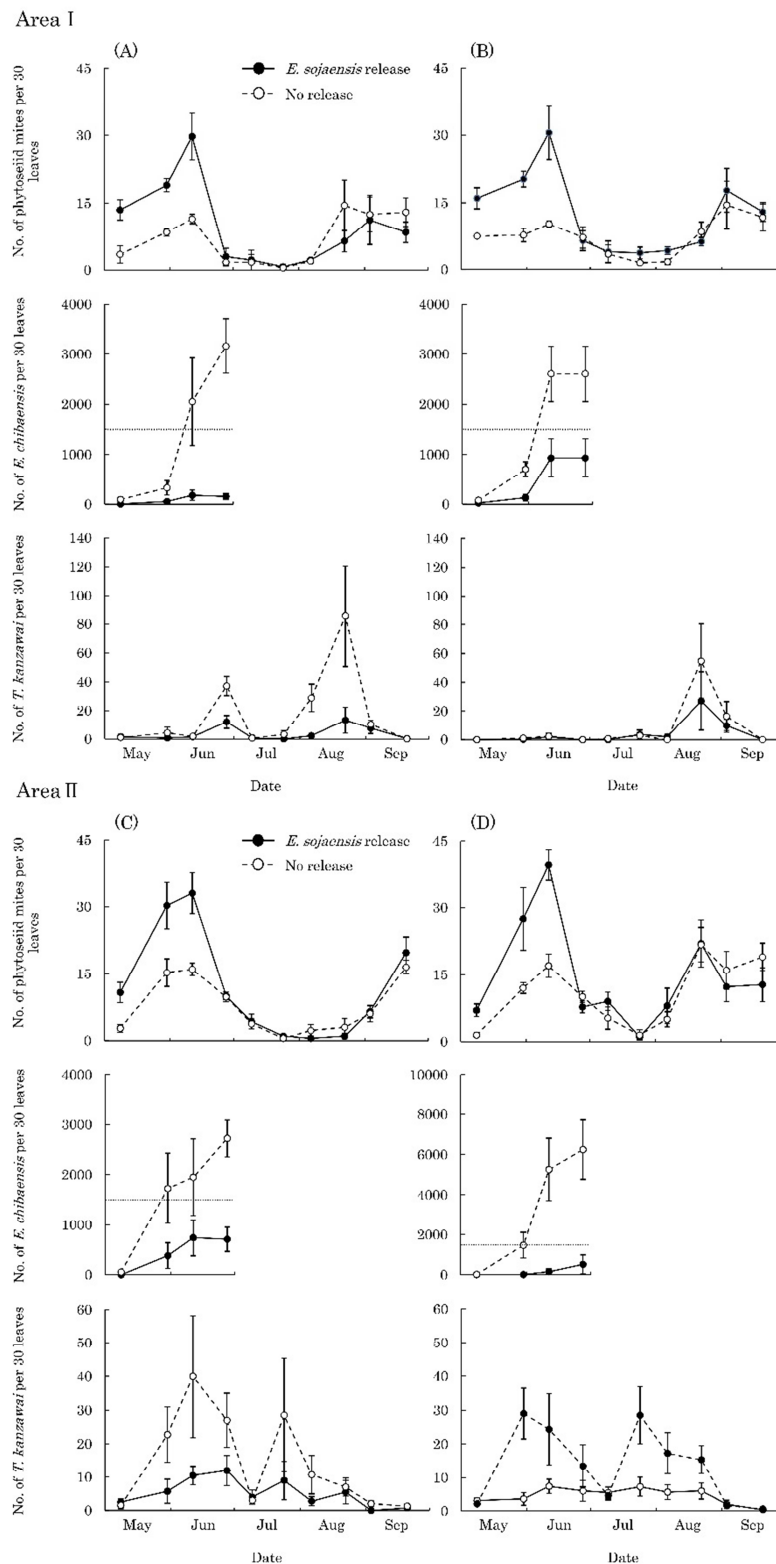
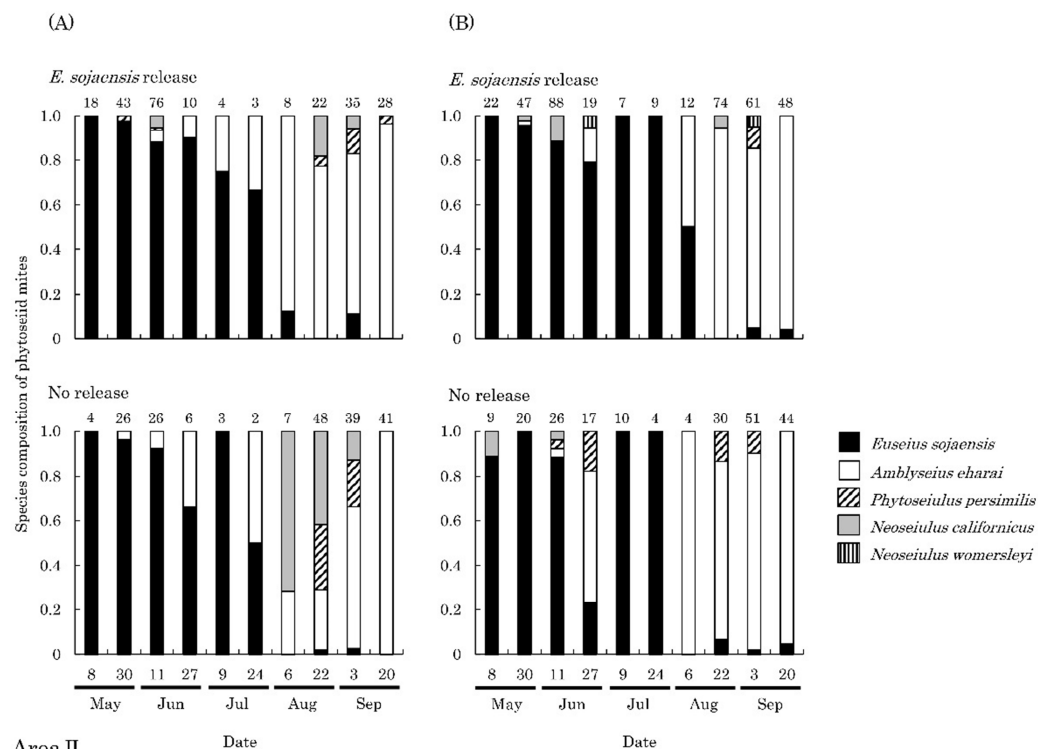


Fig. 13 Seasonal fluctuations in average numbers of phytoseiid mites, *Eriophyes chibaensis*, and *Tetranychus kanzawai* in 2019 on Japanese pear trees in experimental orchards in area I (A, B) and area II (C, D). Horizontal dotted lines indicate the control threshold of 50 *E. chibaensis* per leaf (Izawa, 2000a). Error bars indicate SE. See Fig. 14 for species composition of phytoseids

Area I



Area II

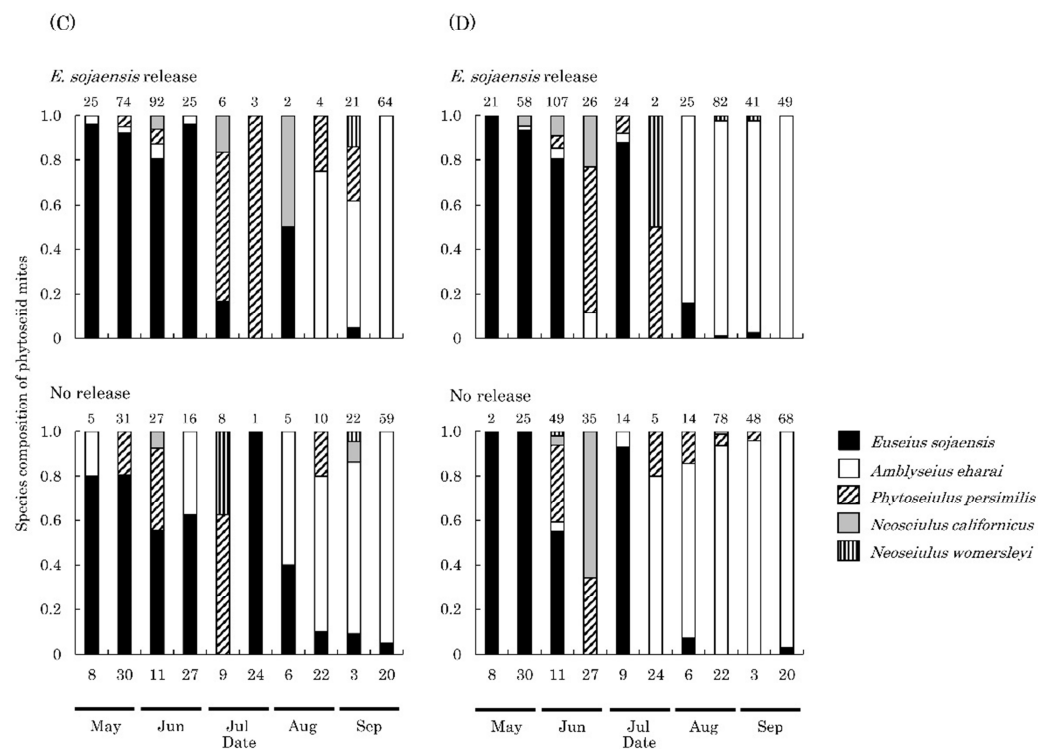


Fig. 14 Species composition of phytoseiid mites captured in experimental orchards in area I (A, B) and area II (C, D). Numbers on bars indicate the numbers of adult females identified

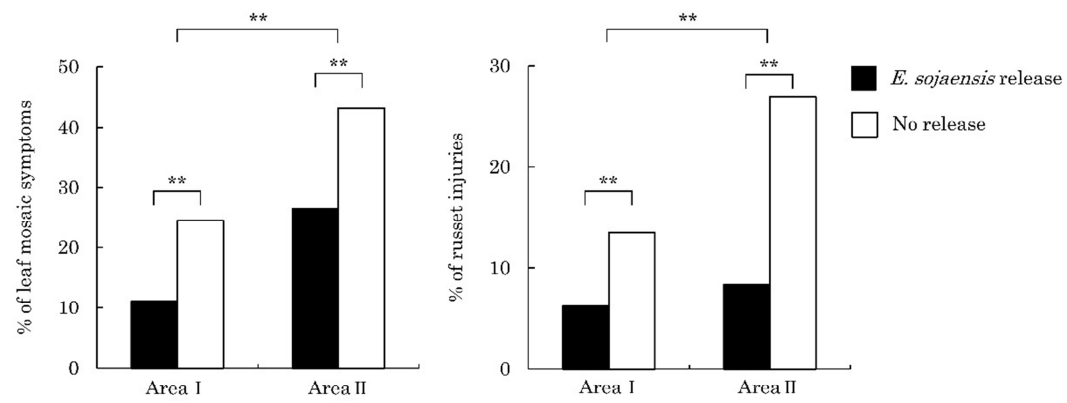


Fig. 15 Percentages of leaves showing severe mosaic and russet symptoms caused by *E. chibaensis* in late June in experimental orchards in area I and area II. Asterisks indicate a significant difference after logistic regression analysis (** $P < 0.001$)

第4章 高品質な代替餌の存在下における2種広食性カブリダニのギルド内捕食および共食いがミカンサビダニの生物的防除に及ぼす影響

1. 緒言

生物的防除を成功させるためには、天敵が害虫に及ぼす直接的な影響のみならず、天敵の種内および種間相互作用が害虫に及ぼす間接的な影響を解明することが重要である。ギルド内捕食や共食いは食物網において一般的にみられる拮抗的相互作用であり (Polis, 1981; Polis et al., 1989; Rosenheim et al., 1993; Rosenheim et al., 1995), 捕食者が害虫の個体数に及ぼす影響の強度に関わる重要な現象である (Rosenheim et al., 1995; Snyder and Ives, 2001; Finke and Denno, 2003; Finke and Denno, 2004). 特に、農業生態系では種の多様性が低くなりやすく、単純な食物網に繋がる可能性があるため、植食者に対する捕食者の影響が明瞭になる (Strong, 1992; Polis et al., 2000). そのため、天敵のギルド内捕食もしくは共食いは捕食者全体の捕食圧を低下させ、最終的には害虫防除効果を弱めることがある (Walde et al., 1992; Rosenheim, 2001; Schausberger and Walzer, 2001; Snyder and Ives, 2001). 一般的に、生物的防除に利用される天敵は農業生態系における食物網の頂点の捕食者ではないため、種内および種間相互作用の影響に対して脆弱になる (Janssen et al., 1998; Rosenheim, 1998; Finke and Denno, 2003). したがって、生物的防除体系におけるカスケード効果を予測し、複数種の天敵が害虫の個体数を抑制する可能性を明らかにするためには、天敵の相互作用の影響を評価する必要がある (Strong, 1992; Schmitz and Suttle, 2001; Finke and Denno, 2003).

カブリダニ類は様々な作物における生物的防除で広く利用されており、効果的な使用方法を検討するためにギルド内捕食や共食いが集中的に研究されてきた (Walzer and Schausberger, 1999; Schausberger and Croft, 2000a, b; Schausberger and Walzer, 2001; Negloh et al., 2012; Calabuig et al., 2018). 広食性天敵は直接的に植食者を捕食できるが、他の天敵を捕食することで間接的に植食者の個体数を増加させることもある。特に、広食性のカブリダニは、ギルド内捕食と共食いによって栄養上の利益を得ることができ、他のカブリダニを代替餌として利用することもできる

(Schausberger and Croft, 2000a, b). したがって、これらの現象は農業生態系における複数種のカブリダニによる害虫防除効果を不安定にする可能性がある。

これまでの研究から、コウズケカブリダニがミカンサビダニの防除に有効であることが明らかとなった (第2章) が、カンキツ園ではニセラーゴカブリダニが優占種となることもある (増井・片山, 2021). これら広食性カブリダニはいずれも6月が発生のピークとなることから、種内および種間相互作用によってその種構成や個体群動態が影響を受け、害虫防除効果に負の影響を及ぼす可能性がある。したがって、合理的な生物的防除体系を構築するためには2種広食性カブリダニの潜在的な相互作用を評価する必要がある。そこで、本章では、コウズケカブリダニとニセラーゴカブリダニの種内および種間相互作用がミカンサビダニの生物的防除に及ぼす影響を評価した。はじめに、これら天敵の増殖に好適なクロマツ花粉の存在下または非存在下において両種のギルド内捕食および共食いの相対的な強度を評価した。次に、花粉の存在下でこれら2種広食性カブリダニの比率を変えて放飼し、ギルド内捕食や共食いがミカンサビダニの密度に及ぼす影響を評価した。

2. 材料および方法

(1) 供試虫および花粉

本試験に供したコウズケカブリダニとニセラーゴカブリダニ、およびミカンサビダニは第1章と同じ系統である。これらの系統を累代飼育して用いた。クロマツの花粉は第3章の第3節と同じ由来のものを使用した。

(2) 高品質な代替餌の存在下または非存在下におけるギルド内捕食および共食いの強度

花粉の存在下または非存在下において、コウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニの雌成虫による同種または異種幼虫の捕食量を調査することにより、両種のギルド内捕食と共食いの相対的な強度を評価した。2種広食性カブリダニの雌成虫に提供する各カブリダニ種の幼虫の組み合わせについて、(1) 20匹の幼虫+花粉および (2) 20匹の幼虫のみの2処理を50反復実施し

た、プラスチック製シャーレ (直径 90 mm, 高さ 20 mm) 内の水を含ませた脱脂綿上にウンシュウミカンの葉片を置いて作成したリーフディスクを用い、葉片の端を湿らせたティッシュペーパーで覆い、 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ のアリーナを作成した。試験開始前に累代飼育中のコロニーからカブリダニの卵を回収し、新たなアリーナ上に静置した。24 時間後、各アリーナに孵化直後の幼虫 20 匹を移し、花粉有無の処理を加えた。花粉を提供する区では、各アリーナに 0.005 g のクロマツ花粉を提供した。累代飼育中の個体群から成熟した雌成虫をランダムに回収し、24 時間絶食させた後に各アリーナに 1 匹ずつ導入した。導入から 24 時間後に捕食された幼虫数を計数した。実験は $22 \pm 1^\circ\text{C}$; $70 \pm 10\%$ RH, 14L: 10D の恒温室内で実施した。

(3) ギルド内捕食と共食いが生物的防除に及ぼす影響

高品質な代替餌の存在下において、コウズケカブリダニとニセラーゴカブリダニの放飼比率を変更することにより、両種のギルド内捕食と共食いがミカンサビダニの生物的防除に及ぼす影響を調査した。コウズケカブリダニとニセラーゴカブリダニの放飼比率が異なる 5 つの処理区 (コウズケカブリダニ: ニセラーゴカブリダニ = (A) 1:0, (B) 2:1, (C) 1:2, (D) 0:1, および (E) 0:0 (無放飼)) を設定した。アクリルケージ ($350 \times 220 \times 350 \text{ mm}^3$) 内にふたつのナツダイダイの実生苗 (10 葉から 15 葉展開) を互いの枝葉が重なるように密着させて設置して 1 反復とし、各処理区につき 4 反復設けた (5 処理区 $\times$ 2 苗 $\times$ 4 反復 = 計 40 苗を使用)。実生苗はポリエチレンポット (直径 90 mm $\times$ 深さ 75 mm) に定植し、実生苗からのカブリダニの逃亡を防ぐため、水を張ったプラスチックトレイ ($100 \times 300 \times 100 \text{ mm}^3$) 上に設置した。なお、実生苗はケージに接触しないように配置した。全ての実生苗の葉上に約 100 匹のミカンサビダニが寄生した葉片を静置して本害虫を接種した。2 週間後、各実生苗から任意の 4 葉を直径 10 mm のコルクボーラーで打ち抜き、葉片上に寄生するミカンサビダニの虫数を実体顕微鏡 (Olympus SZX16) 下で計数した。この時点での反復 (2 苗 $\times$ 4 葉片 = 8 葉片 = 628 mm^2) あたりのミカンサビダニの平均虫数 ($\pm$ SE) は、 89.9 ± 3.2 匹であった。

ミカンサビダニを接種してから 2 週間後に、産卵開始 1 週間以内の腹部が肥大したコウズケカブリダニもしくはニセラーゴカブリダニの雌成虫を設定した処理区に従って 2 苗につき 24 匹放飼した。カブリダニの産卵基

質として $5 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$ にカットしたフェルトを各実生苗の任意のトゲ部に 4 つ刺した。その後、筆を用いて 0.025 g のクロマツの花粉を各実生苗の葉上に振りかけた。カブリダニは 7 日ごとに再放飼し、花粉は 3 日から 4 日ごとに再提供した。初回放飼の 3 週間後 (E を除く各処理につき 72 個体のカブリダニ雌成虫を放飼した) に各実生苗から同様のコルクボーラーで 4 葉片を打ち抜いて寄生するミカンサビダニを実体顕微鏡 (Olympus SZX16) 下で計数するとともに、全ての実生苗を解体してカブリダニの成虫、若虫 + 幼虫、およびフェルト上の卵を計数した。

カブリダニは全て Hoyer 氏液にマウントし、位相差顕微鏡 (Olympus BX51) 下で内部および外部形態から種および发育ステージを同定した (Toyoshima et al. 2013)。種は雌成虫のみについて同定した。実験は $22 \pm 1^\circ\text{C}$; $70 \pm 10\%$ RH, 14L: 10D の恒温室内で 5 週間実施した。

3. 統計処理

カブリダニ種と花粉の存在が同種または異種カブリダニ幼虫の捕食量に及ぼす影響を評価するため、データを一般線形モデルにより解析した。応答変数は捕食された同種または異種カブリダニ幼虫数とし、説明変数はカブリダニの種と花粉の有無およびこれらの交互作用とした。交互作用が認められた場合は Bonferroni 法により有意水準を調整 ($P < 0.05/2 = 0.025$) した上で単純主効果検定を行い、処理間の差を解析した。

コウズケカブリダニとニセラーゴカブリダニの放飼比率の違いがカブリダニおよびミカンサビダニの個体数に及ぼす影響を評価するため、データを一般線形モデルにより解析した。応答変数は試験終了時のカブリダニまたはミカンサビダニの成虫と幼若虫の合計数とし、説明変数は処理とした。有意差が認められた場合には Tukey の HSD 検定により処理間の差を解析した。

処理がカブリダニの種や发育ステージに及ぼす影響を評価するため、データを一般線形モデルにより評価した。応答変数は試験終了時のコウズケカブリダニまたはニセラーゴカブリダニの雌成虫数、両種の雄成虫数、幼若虫数、および卵数とし、説明変数は処理とした。有意差が検出された場合には Tukey の HSD 検定により処理間の差を解析した。

全ての検定には JMP version 12 (SAS Institute, 2015) を用いた。データを正規化するため、ダニ類の個体数は

それぞれ0.5を加算して対数変換 (Yamamura, 1999) した値を用いた。

4. 結果

花粉の存在下または非存在下において、コウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニの雌成虫1匹が1日に捕食する同種幼虫(共食い)および異種幼虫(ギルド内捕食)の平均捕食量を Fig. 16 に示した。共食いされた幼虫数はカブリダニの種 ($F_{1,196}=335.31, P<0.0001$) および花粉の存在 ($F_{1,196}=337.07, P<0.0001$) の影響を受け、これらの交互作用も検出された ($F_{1,196}=211.58, P<0.0001$)。花粉の有無にかかわらず、コウズケカブリダニに共食いされた幼虫数はニセラーゴカブリダニのそれよりも有意に少なかった(花粉あり: $F_{1,196}=539.80, P<0.0001$; 花粉なし: $F_{1,196}=7.09, P<0.01$, Fig. 16)。両種とも花粉の存在下では非存在下よりも共食いされた幼虫数が有意に少なかった(コウズケカブリダニ: $F_{1,196}=541.37, P<0.0001$; ニセラーゴカブリダニ: $F_{1,196}=7.27, P<0.01$)。花粉の存在下では、コウズケカブリダニの共食いは84%減少したが、ニセラーゴカブリダニの共食いは14%の減少であった。

捕食された異種幼虫数はカブリダニの種 ($F_{1,196}=299.39, P<0.0001$) および花粉の存在 ($F_{1,196}=290.11, P<0.0001$) の影響を受け、これらの交互作用も検出された ($F_{1,196}=196.18, P<0.0001$)。花粉の有無にかかわらず、コウズケカブリダニに捕食された異種幼虫数はニセラーゴカブリダニのそれよりも有意に少なかった(花粉あり: $F_{1,196}=490.14, P<0.0001$; 花粉なし: $F_{1,196}=5.43, P=0.021$, Fig. 16)。両種とも花粉の存在下では非存在下よりも捕食された異種幼虫数が有意に少なかった(コウズケカブリダニ: $F_{1,196}=481.72, P<0.0001$; ニセラーゴカブリダニ: $F_{1,196}=4.58, P=0.02$)。花粉の存在下では、コウズケカブリダニのギルド内捕食は79%の減少であったが、ニセラーゴカブリダニのギルド内捕食は10%の減少であった。

試験終了時の実生苗上におけるカブリダニとミカンサビダニの個体数を Fig. 17 に示した。カブリダニの個体数は2種広食性カブリダニの放飼比率によって影響を受け ($F_{3,12}=53.86, P<0.001$)、A (コウズケカブリダニ単独放飼) と B (コウズケカブリダニ: ニセラーゴカブリダニ=2:1) が最も多く、次いで C (=1:2) または D (ニセラーゴカブリダニ単独放飼) の順となった (Tukey の HSD 検定, $P<0.05$)。ミカンサビダニの個

体数も2種広食性カブリダニの放飼比率によって影響を受け ($F_{4,15}=32.06, P<0.001$)、A が最も少なく、次いで B、最後に C、D または E (無放飼) の順となった (Tukey の HSD 検定, $P<0.05$)。

試験終了時のカブリダニの種と各発育ステージ別の個体数を Table 8 に示した。雌成虫と幼若虫、卵の数は2種広食性カブリダニの放飼比率によって影響を受けた(コウズケカブリダニ雌成虫: $F_{3,12}=911.66, P<0.001$, ニセラーゴカブリダニ雌成虫: $F_{3,12}=31.47, P<0.005$, 幼若虫: $F_{3,12}=96.34, P<0.001$, 卵: $F_{3,12}=37.93, P<0.001$)。コウズケカブリダニの雌成虫数は、コウズケカブリダニの放飼比率が高いほど多かった。一方、ニセラーゴカブリダニの雌成虫数はニセラーゴカブリダニの放飼比率が高い C であってもコウズケカブリダニが優占種であった。幼若虫や卵の数は A と B が C と D よりも多かった。この結果は、ニセラーゴカブリダニがコウズケカブリダニよりも多く放飼された場合、未成熟な齢期の数が有意に少なかったことを示している。

5. 考察

花粉の有無にかかわらず、ニセラーカブリダニはコウズケカブリダニよりも優位なギルド内捕食者および共食い捕食者であった。花粉の存在下では非存在下と比較して両種のギルド内捕食と共食いが緩和された。ただし、ニセラーゴカブリダニのギルド内捕食と共食いはコウズケカブリダニのそれと比較して大幅には緩和されなかった。コウズケカブリダニを単独で放飼した場合、コウズケカブリダニの個体数が増加し、ミカンサビダニは防除された (Fig. 17)。一方、ニセラーゴカブリダニを単独で放飼した場合、ニセラーゴカブリダニの個体数は増加せず、ミカンサビダニに対する防除効果は不十分であった (Fig. 17)。さらに、コウズケカブリダニとニセラーゴカブリダニを同時に放飼した場合、ニセラーゴカブリダニの放飼比率が高い方がカブリダニの個体数は少なく、ミカンサビダニの密度は高かった (Fig. 17)。これらの結果から、ニセラーゴカブリダニの存在は、ギルド内捕食と共食いによってカブリダニ全体の密度を低下させ、高品質な代替餌が存在する場合でも、害虫の密度に対して間接的に正の効果をもたらす可能性が示唆された。本章の結果は、農業生態系に生息する広食性カブリダニの多様性を高めることが必ずしも生物的防除を成功させるわけではないことを意味している。合理的な生物的防除体系を構築するためには天敵の種内および種

間相互作用を考慮する必要がある。

コウズケカブリダニとニセラーゴカブリダニを同時に放飼した場合、ニセラーゴカブリダニの放飼比率が高い方がカブリダニの卵、幼若虫の数が少なかった (Table 8)。したがって、ニセラーゴカブリダニは同種もしくは異種カブリダニを好んで捕食する可能性がある。試験終了時の A 区 (コウズケカブリダニ単独放飼) におけるコウズケカブリダニの雌成虫数は、試験期間内に放飼したコウズケカブリダニ雌成虫数の 0.92 倍であったのに対し、B 区 (コウズケカブリダニ: ニセラーゴカブリダニ = 2: 1) では 0.63 倍、C 区 (= 1: 2) では 0.35 倍であった (Table 8)。すなわち、ニセラーゴカブリダニの放飼比率が高いほどコウズケカブリダニ個体群の増殖率は低かった。このことから、ニセラーゴカブリダニがコウズケカブリダニよりも優位なギルド内捕食者であり、コウズケカブリダニの個体群の増殖を抑制したことが示唆された。また、ニセラーゴカブリダニの放飼比率が高い方がミカンサビダニの密度は高かった (Fig. 17)。以上のことから、これら 2 種広食性カブリダニが同時に存在する場合、ニセラーゴカブリダニのギルド内捕食がコウズケカブリダニによる生物的防除を妨げる可能性がある。このような、優位な捕食者の存在が別の天敵種による捕食圧を弱め、共通の餌種である植食者の抑制効果を低下させる現象は、他の節足動物の食物網でも確認されている (Rosenheim, 2001; Snyder and Ives, 2001; Snyder and Wise, 2001; Finke and Denno, 2003; Finke and Denno, 2004)。本研究の結果は、優位なギルド内捕食者 (ニセラーゴカブリダニ) が他の天敵かつギルド内被食者 (コウズケカブリダニ) に負の影響を及ぼし、害虫 (ミカンサビダニ) に対して正の効果をもたらすという生物間相互作用の理論のひとつ (Rosenheim et al., 1995; Janssen et al., 2006) と一致する。

コウズケカブリダニ単独放飼区では放飼後にコウズケカブリダニの個体数が増加したが、ニセラーゴカブリダニ単独放飼区ではニセラーゴカブリダニの個体数は増加しなかった (Table 8)。また、ミカンサビダニの密度はニセラーゴカブリダニ単独放飼区がコウズケカブリダニ単独放飼区よりも高かった (Fig. 17)。これらのことから、ニセラーゴカブリダニはコウズケカブリダニよりも頻繁に共食いを行い、これがミカンサビダニに対する防除効果を弱めた可能性がある。同様の傾向は第 3 章のニホンナシにおけるカンザワハダニを対象とした場合でも確認され、コウズケカブリダニを単独放飼した

場合はカブリダニの個体数が増加し、カンザワハダニを抑制できたが、ニセラーゴカブリダニを単独放飼した場合はカブリダニの個体数は少なく、カンザワハダニが多発した。多くの広食性カブリダニ雌成虫は同種と異種の幼若虫を区別でき、同種よりも異種を積極的に捕食する (Schausberger and Croft, 2000b; Schausberger, 2003)。しかし、本研究では、ニセラーゴカブリダニの放飼比率が高い C 区でも優占種はコウズケカブリダニであった (Table 8) ことから、ニセラーゴカブリダニは同種よりも異種を好んで捕食したとは言えない。本天敵は異種の卵よりも同種の卵を捕食した方が内的自然増加率は高くなるため、他種のカブリダニが存在する場合でも同種を好んで捕食すると考えられている (Ji et al., 2015)。これらのことから、ニセラーゴカブリダニはギルド内捕食よりも共食いする傾向が強い可能性がある。リンゴ園では広食性カブリダニである *Typhlodromus pyri* (Scheuten) は共食いによって生物的防除効果を低下させ、リンゴハダニの多発を招いた (Walde et al., 1992)。以上のことから、ニセラーゴカブリダニはミカンサビダニを一日あたり最大 500 匹捕食できる (第 2 章) にもかかわらず、共食いによって本害虫に対する防除効果が不十分になったと考えられる。

ギルド内捕食はギルド外の餌が豊富な場合に、共食いは異種の餌が豊富な場合にそれぞれ緩和される (Lucas et al., 1998; Snyder et al., 2000; Lucas et al., 2009)。生物的防除の場面では、カブリダニ類に高品質な花粉や餌を与えるとギルド内捕食や共食いを緩和することができ (Negloh et al., 2012; Guzmán et al., 2016; Calabuig et al., 2018; Warburg et al., 2018; Marcossi et al., 2020)、害虫の密度抑制を妨げる可能性のある天敵種間の負の相互作用が軽減される (Messelink et al., 2012)。本研究で提供されたクロマツの花粉はコウズケカブリダニとニセラーゴカブリダニの増殖や発育に適した餌である (増井・片山, 2019) が、ミカンサビダニは両種にとって適した餌種ではない (Kishimoto, 2014)。天敵にとって花粉が害虫よりも好まれる場合、短期的には花粉の提供は天敵の有効性に悪影響を与える可能性があるが、害虫と花粉をバランスよく混合すると天敵の個体数が増加し、長期的には生物的防除の効果が向上する (Samaras et al., 2021)。本研究では、コウズケカブリダニのギルド内捕食と共食いは花粉の存在によって大幅に抑制される (Fig. 16) ことを明らかにした。したがって、コウズケカブリダニは共食いを緩和し、個体数を

増加させる補助的な餌として花粉を摂食することにより、餌として適していない獲物（害虫）を防除できた可能性がある。一方、ニセラーゴカブリダニのギルド内捕食や共食いは花粉の存在下でも大幅には抑制されない（Fig. 16）ことを明らかにした。したがって、ニセラーゴカブリダニ単独放飼やコウズケカブリダニとニセラーゴカブリダニの混合放飼は高品質な花粉が常に供給されていたにもかかわらず、ニセラーゴカブリダニによる激しい共食いとギルド内捕食により害虫を十分に防除することができなかった可能性がある。このような、代替餌提供の有効性に関する両種の違いは第2章でも確認され、クロマツの花粉を提供するとコウズケカブリダ

ニではミカンサビダニに対する防除効果が強化されるが、ニセラーゴカブリダニでは強化されなかった。

ギルド内捕食は生物的防除をあまり妨げず（Janssen et al., 2006）、広食性捕食者による生物的防除は多くの場合成功している（Janssen and Sabelis, 2015）。しかし、本研究では、ニセラーゴカブリダニのような一部の天敵種では好適な代替餌を提供してもギルド内捕食や共食いを緩和できず、害虫を十分に防除できないことが明らかとなった。結論として、生物的防除の対象となる害虫種によっては、強力なギルド内捕食者または共食い捕食者を人為的に排除する必要があるかもしれない。

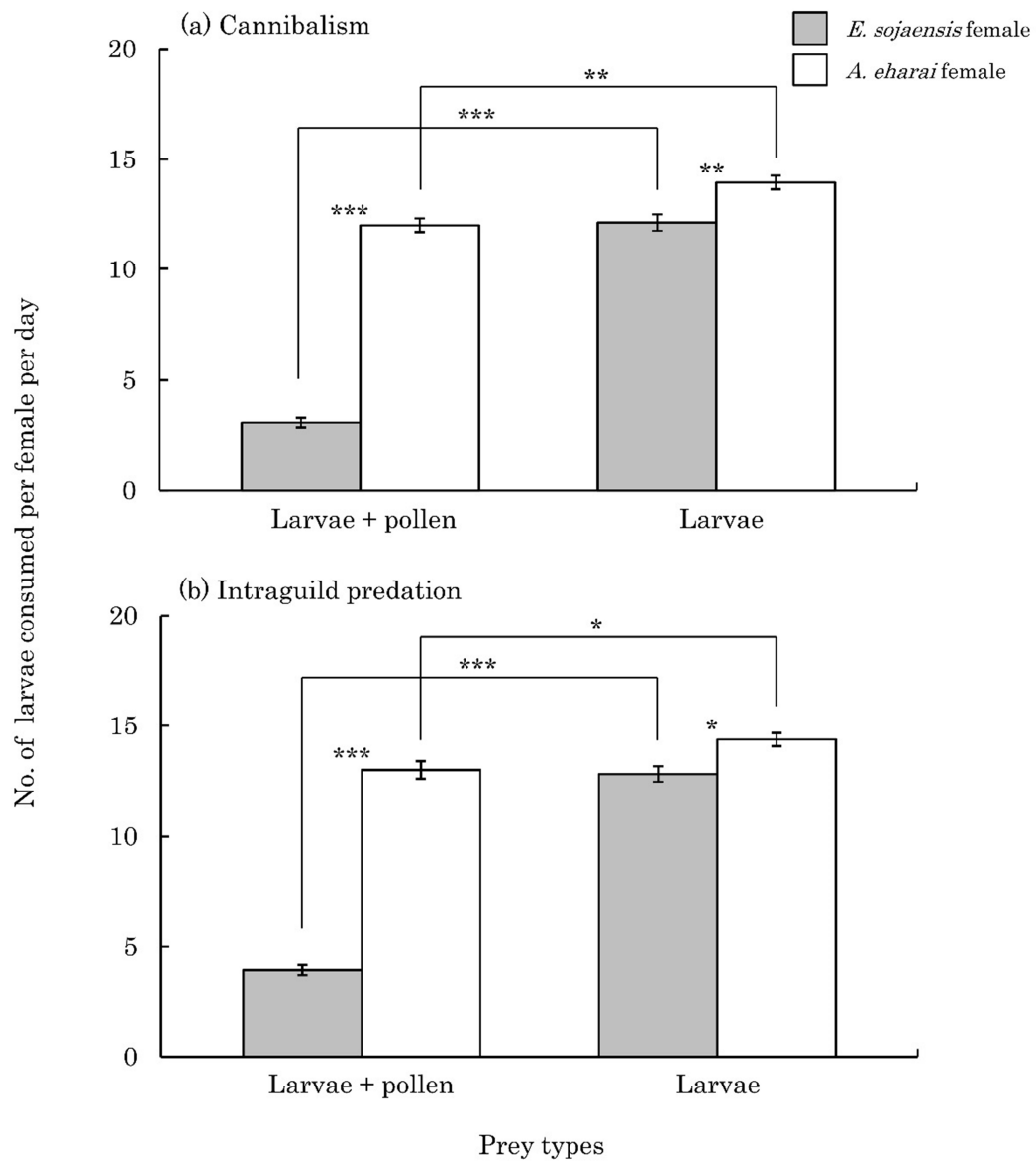


Fig. 16 Mean numbers of larvae consumed daily via (a) cannibalism and (b) intraguild predation by a *Euseius sojaensis* or *Amblyseius eharai* female in the presence or absence of high-quality food (pine pollen). Error bars indicate $\pm$ SE. Asterisks indicate significant differences following simple main effect test with using Bonferroni correction (*** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.025$)

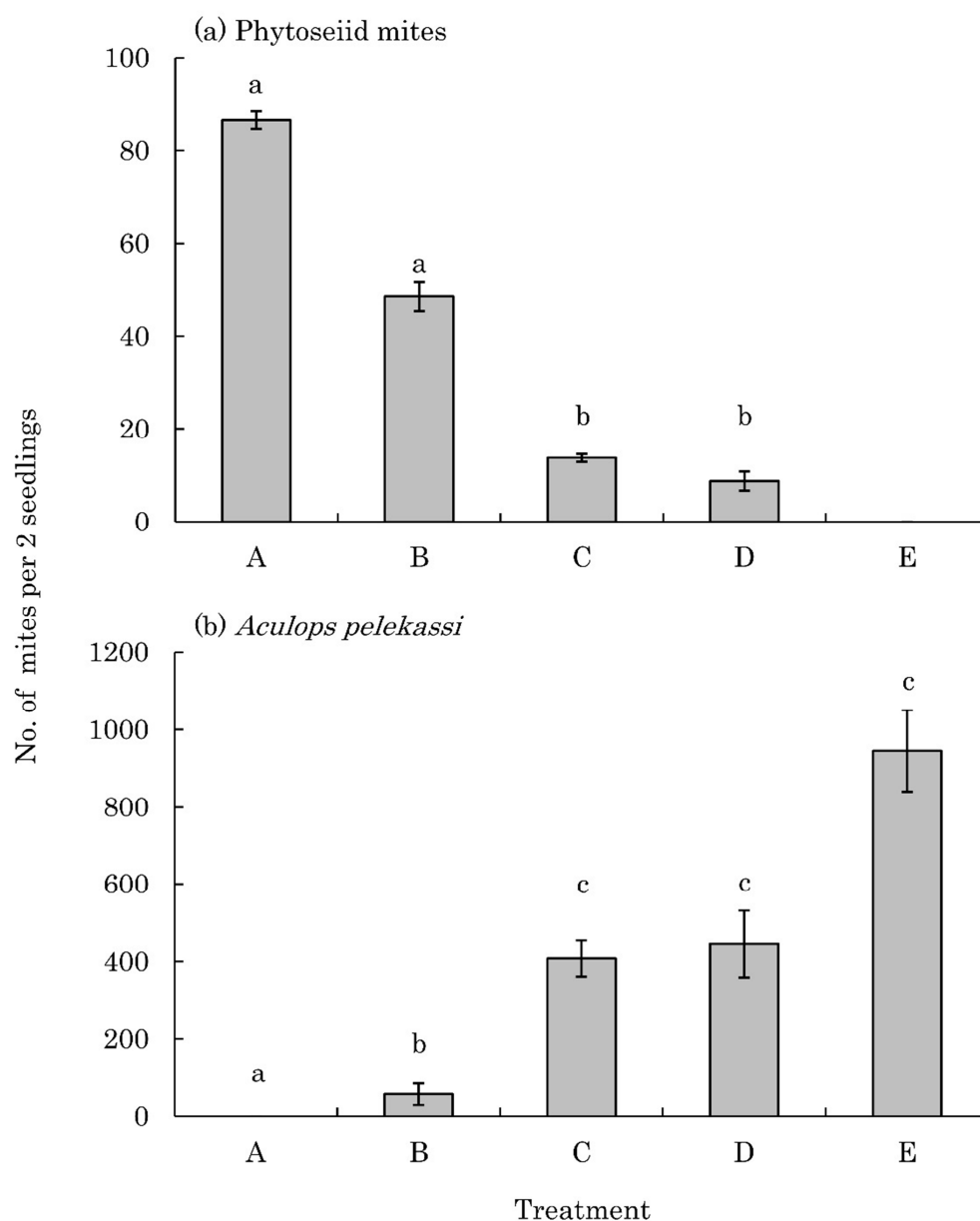


Fig. 17 Mean combined numbers of adults, nymphs, and larvae of (a) phytoseiid mites and (b) *Aculops pelekassi* at the end of five treatments with different ratios of release of *E. sojaensis* to *A. ehara*: A (1:0), B (2:1), C (1:2), D (0:1), and E (0:0, no release) on two citrus seedlings. A total of 72 phytoseiid adult females were released per two seedlings per cage in each treatment except E. Error bars indicate SE. The number of *A. pelekassi* was counted on four leaf discs (= 314 mm²) per seedling. Values with the same letter are not significantly different by Tukey's HSD test, $P > 0.05$

Table 8 Mean numbers ($\pm$ SE) of adult female *Euseius sojaensis* and *Amblyseius eharai* and total numbers of phytoseiid males, nymphs + larvae, and eggs per seedlings pair at the end of the trial

Treatment (<i>E. sojaensis</i> to <i>A. eharai</i> ratio) ^a	Adult females		Adult males	Nymphs + larvae	Eggs
	<i>E. sojaensis</i>	<i>A. eharai</i>			
A (72:0)	66.0 $\pm$ 2.8 a	0 b	0 a	16.8 $\pm$ 0.5 a	56.0 $\pm$ 2.2 a
B (48:24)	30.0 $\pm$ 2.3 b	4.8 $\pm$ 1.0 a	0 a	11.8 $\pm$ 2.3 a	34.3 $\pm$ 4.9 a
C (24:48)	8.5 $\pm$ 0.9 c	4.0 $\pm$ 0.4 a	0.3 $\pm$ 0.3 a	0.8 $\pm$ 0.3 b	14.3 $\pm$ 2.7 b
D (0:72)	0 d	8.3 $\pm$ 2.1 a	0 a	0 b	5.5 $\pm$ 1.6 b

Values with the same letter within each column are not significantly different by Tukey's HSD test, $P > 0.05$

^a Total number of phytoseiid adult females released per two seedlings during the trial

第5章 総合考察

これまで、我が国の果樹における生物的防除は、特定の害虫種のみを対象とした狭食性の天敵が主に利用されてきた。そのため、標的外の害虫が多発した場合は化学農薬による防除に頼らざるを得ず、これにより天敵が排除され、IPMの崩壊が引き起こされるという問題を抱えていた。そこで、本研究では、複数種の微小害虫を捕食可能な広食性の土着天敵であるコウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニの害虫防除における有効性について、室内および野外操作実験により検証した結果、コウズケカブリダニがフシダニ類やハダニ類に対して高い防除効果を持つことを明らかにした。特に、フシダニ類はこれまで化学農薬のみによって防除されてきたが、本研究により経済栽培園におけるコウズケカブリダニを利用した生物的防除の実現可能性が新たに示された。さらに、害虫の低密度発生時からコウズケカブリダニの放飼増強や本天敵の増殖に好適な代替餌である花粉を人為的に提供することにより、害虫の多発前に本天敵の密度が高まる結果、害虫防除効果が強化されることを明らかにした。花粉の存在下では、コウズケカブリダニのギルド内捕食や共食いは大幅に緩和したことから、花粉の提供は本天敵による防除効率を高めた可能性がある。一方、花粉の存在下でも、ニセラーゴカブリダニのギルド内捕食や共食いは大幅には緩和しなかった。ニセラーゴカブリダニはコウズケカブリダニよりも優位な捕食者であることから、これら2種広食性カブリダニが同時に存在する場合、たとえ花粉が供給される条件下でも、ニセラーゴカブリダニによるギルド内捕食や共食いによってカブリダニ全体の密度が高まらず、害虫防除効果が弱まる可能性がある。本章では、カンキツ類およびニホンナシを例として、既存の防除体系における課題を示した上で、広食性の天敵であるコウズケカブリダニの利用を組み込んだ新たなIPMを提案する。また、農業生態系における広食性カブリダニの害虫防除効果をより発揮させる生物的防除について、天敵の放飼増強や機能強化、種内および種間相互作用の観点から総合的に論じる。

近年、化学農薬によって主要病害虫と同時に防除されていたフシダニ類の被害が顕在化しており、既存のIPMに統合可能な新たな個別防除技術の開発が喫緊の課題

となっている。例えば、カンキツ園では薬剤抵抗性を発達させたミカンサビダニが多発しているため、九州では1997年から8年間にわたって各県の試験研究機関が連携し、本害虫の防除体系が検討された(植原, 2006)。また、ニホンナシ園ではニセナシサビダニに起因するモザイク症が2010年に熊本県で初確認され(杉浦, 2013)、その被害は全国に拡大している。これまでに、カンキツ類およびニホンナシでは選択性薬剤の開発や伝統的生物的防除の成功、および性フェロモンの利用技術の確立により、カイガラムシ類やハマキムシ類等の主要害虫に対する非選択性薬剤の散布回数が大幅に削減された。このことが契機となり、土着天敵の保護利用による総合的病害虫防除体系が確立され、静岡県では現在、ハダニ類を対象とした殺ダニ剤の使用は年間1回から2回にまで削減されている(増井, 2011; 静岡県経済農業協同組合連合会, 2021)。しかし、フシダニ類が多発した場合、生産者は年間2回程度の殺ダニ剤を追加散布する必要がある(Ashihara et al., 2004; 伊澤, 2000)。フシダニ類に効果の高い薬剤は土着天敵に対する影響が大きいいため、本害虫を化学農薬により防除すると土着天敵が排除され、その結果、ハダニ類のリサージェンスを引き起こす可能性がある(土田・増井, 2018)。このように、フシダニ類の多発はIPMにより削減した殺ダニ剤の使用回数を再び増加させることから、土着天敵が持つ害虫防除機能を妨げるのみならず、害虫の薬剤抵抗性の発達リスクを再び高める要因となっている。したがって、害虫の薬剤抵抗性発達のリスクを低減し、かつ既存のIPMと矛盾なくフシダニ類とハダニ類の被害を防ぐ観点から、広食性の土着天敵を利用してこれら害虫を同時防除する技術の開発が望まれる。

フシダニ類やハダニ類の土着天敵として、カブリダニ類、ナガヒシダニ類、捕食性昆虫、および昆虫病原糸状菌の一種などが挙げられる(Helle and Sabelis, 1985; 江原, 1993; Lindquist et al., 1996)。その中でも特に、広食性のカブリダニは農業生態系における微小害虫の有力な捕食者として、世界中で多くの研究が蓄積されている(Sabelis, 1996; McMurtry et al., 2013)。我が国の果樹園に広く生息する広食性のニセラーゴカブリダニとコウズケカブリダニについても、フシダニ類(Kondo and

Hiramatsu, 1999b) やハダニ類 (Tanaka and Kashio, 1977; Osakabe et al., 1987) に対する密度抑制効果が確認されているが、どちらの種がダニ類をより効果的に防除できるかは明らかになっていなかった。これら2種広食性カブリダニはミカンサビダニのみを餌とした場合はほとんど増殖できず (Kishimoto, 2014)、また、*Tetranychus* 属ハダニが形成する不規則立体網によって行動が制限される (Osakabe et al., 1987; Osakabe, 1988; 柿元ら, 2004) ため、こうした害虫の多発時には防除効果が期待できない。一方、広食性カブリダニは害虫の低密度発生時から花粉等の代替餌を摂食することで、その個体群密度を維持・上昇させ、その結果、害虫防除効果を発揮することが知られている (McMurtry, 1992; McMurtry and Croft, 1997; Messelink et al., 2014)。そこで、本研究では、カンキツ類のミカンサビダニおよびニホンナシのカンザワハダニを対象害虫として、害虫の低密度発生時からコウズケカブリダニもしくはニセラーゴカブリダニを放飼し、代替餌として花粉を提供することにより、これら天敵の密度を高めた条件下における害虫防除効果を検討した (第2章, 第3章)。その結果、2種広食性カブリダニのうちコウズケカブリダニのみがこれらの害虫を防除可能であった。我が国ではフシダニ類の防除に有効な土着天敵種はこれまで知られていなかったが、本研究によりコウズケカブリダニがフシダニ類に対して高い防除効果を持つことが明らかとなった。一般的に、フシダニ類は寄主特異性が高い (上遠野, 2003) が、コウズケカブリダニはカンキツ類やニホンナシのみならず、リンゴ、モモ、ブドウ *Vitis* spp., カキ *Diospyros kaki* Thunb., ウメ *Prunus mume* Sieb. et Zucc., クリ *Castanea crenata* Sieb. et Zucc. といった多くの果樹上で発見される (Toyoshima et al., 2013) ことから、本天敵の利用により多様な樹種において多種のフシダニに対する生物的防除が可能になるかもしれない。

病害虫防除と土着天敵の保護を両立させるためには、天敵に影響のある時期の化学農薬の使用回避や影響のない薬剤の選択などが必要となる (Ruberson et al., 1998)。しかし、我が国の果樹栽培では主に生鮮用の果実が生産されるため、果実被害を引き起こす主要病害虫の防除が必須である。例えば、一般的なカンキツ園ではカンキツ黒点病を対象としたジチオカーバメート系殺菌剤が年間4回以上散布される (井沼, 2017)。また、ニホンナシ園ではナシ黒星病やナシ黒斑病等の病害を対

象としたベンゾイミダゾール系殺菌剤やポリオキシシン剤、および果樹カメムシ類を対象とした合成ピレスロイド系殺虫剤が年間複数回散布される (貞松ら, 1986; 梅本, 1993; Kishimoto, 2002; 岸本, 2004)。コウズケカブリダニはこれら非選択性薬剤の影響を強く受ける (岸本ら, 2018; 岸本ら, 2020; 土田・増井, 2019) ため、慣行防除園ではほとんど発生せず (Kishimoto, 2002; Katayama et al., 2006; 岸本ら, 2007)、これまで害虫防除に活用されていなかった。一方、本天敵は非選択性薬剤の使用を低減した果樹園では春に増殖を開始し、初夏に最も密度が高くなる (Kondo and Hiramatsu, 1999b; 大西ら, 2003; 増井・片山, 2017)。そこで、既存の防除体系を改変し、コウズケカブリダニを保護利用するカンキツ類およびニホンナシの新たな IPM を Fig. 18 および Fig. 19 にそれぞれ提案する。この新たな IPM では、初夏までに使用される化学農薬をコウズケカブリダニに対して影響の小さい選択性薬剤 (Table 9) に変更することにより、本天敵の保護利用と主要病害虫の防除との両立が可能となり、フシダニ類やハダニ類の生物的防除が実現できる。

コウズケカブリダニは花粉等の餌を摂食することで害虫の低密度発生時から植物体上で個体数を増加させ、その結果、フシダニ類やハダニ類を捕食してその密度上昇を防ぐ。このような広食性天敵の持つ機能を利用して害虫の多発を未然に防ぐ方法は、予防的生物的防除 (preventive biological control: Messelink et al., 2014) と称される。そこで、ここでは、コウズケカブリダニによる予防的生物的防除を組み込んだ総合的防除体系を「guarding-IPM (以下、G-IPM)」と提唱する。

経済栽培果樹園において、複数種のダニ類に対するコウズケカブリダニの保護と本天敵の放飼増強による G-IPM の実用性を評価した (第2章, 第3章)。慣行防除下ではコウズケカブリダニの発生はほとんど認められなかったが、保護防除下では本天敵が多く発生し、選択性薬剤への変更による本天敵の保護効果が確認された。重要病害虫の防除薬剤は非選択性薬剤が多いが、それらのフシダニ類に対する殺虫効果は低く (土田・増井, 2018)、逆にコウズケカブリダニを排除する (土田・増井, 2019)。このことから、慣行防除園でフシダニ類が多発する原因のひとつとして、非選択性薬剤の使用によってコウズケカブリダニが排除されることによりもたらされるリサージェンスの可能性が示唆された。加えて、コウズケカブリダニを放飼増強すると、カンキツ園ではミ

カンサビダニの防除が、ニホンナシ園ではニセナシサビダニとカンザワハダニの同時防除がそれぞれ可能であった。以上のことから、コウズケカブリダニの発生時期である4月から6月末まで本天敵を保護および放飼増強することにより、複数種のダニ類を防除できると考えられた。コウズケカブリダニの発生生態を利用したこのG-IPMは、本天敵の生息が確認された果樹に広く適用できる可能性がある。一方、コウズケカブリダニを放飼増強しないとフシダニ類の被害が経済的に許容できない水準となる場合がある(第2章, 第3章)ことから、本害虫の多発園では自然発生する本天敵の保護のみでは防除効果が得られない可能性がある。

天敵による害虫防除効果を安定させるため、果樹では土着カブリダニの保護利用とカブリダニ製剤との放飼増強を組み合わせた総合的防除体系が提案されている(農研機構, 2021)。しかし、果樹で使用可能なカブリダニ製剤は、現在、輸入されたミヤコカブリダニまたはスワルスキーカブリダニのみであり、それらの対象害虫はハダニ類またはアザミウマ類に限られている。加えて、放飼増強される外来の天敵には環境に対する安全性の懸念もある(Paula et al., 2021)。製剤化されたミヤコカブリダニは欧州産の系統であるため、在来系統と交雑した個体群の出現とその分布拡大の可能性があることが指摘されている(Gotoh et al., 2004)。また、スワルスキーカブリダニは外来種であることから、本種が越冬して定着することがないよう、露地での使用については対象地域が制限されている(Arysta Life Science, 2021)。加えて、スワルスキーカブリダニは土着のカブリダニ類よりも優位なギルド内捕食者であることが示唆されている(Maoz et al., 2014; Ji et al., 2015)。生物的防除のために海外から導入された天敵によって標的外の土着生物が減少する事例が数多く報告されている(Howarth, 1991)ことから、環境への影響を最小限にするためには、在来種かつ在来系統の天敵を利用する必要がある。コウズケカブリダニはハダニ類やフシダニ類、およびアザミウマ類といった多くの微小害虫種を捕食することが確認されており(Osakabe, 1987; Kasai et al., 2002; Shibao et al., 2004)、かつ南西諸島から東北地方まで広く生息している在来種である(Toyoshima et al., 2013)。以上のことから、環境に対する安全性を確保した上でフシダニ類を含めた複数種の害虫の同時防除効果を安定させるためには、コウズケカブリダニを生物農薬として製剤化し、放飼増強することが有効と考えられる。ただ

し、在来の天敵であっても国内外来種となる可能性があるため、露地栽培条件で利用する場合は事前に製剤化されるコウズケカブリダニの系統の環境リスクを評価しておく必要がある。欧州では、施設園芸作物の微小害虫を対象に *Euseius* 属カブリダニが生物農薬として利用されている(van Lenteren et al., 2017)ことから、今後、同属のコウズケカブリダニが製剤化された場合、本天敵の放飼増強によるG-IPMは果樹のみならず幅広い作物に適用できるかもしれない。

土着天敵による害虫防除効果を高めるためには、園地内外の植生管理により生息場所や餌の供給源を整備するなど、土着天敵の個体群を維持・増殖させる保全的生物的防除(conservation biological control: Barbosa, 1998)の考え方が重要である(Landis et al., 2000; Gurr et al., 2004; 農山漁村文化協会, 2016)。現在、果樹園ではカバークロップ等の草生栽培により生息場所や花粉源を管理してカブリダニ類の発生を助長し、害虫防除効果を強化する取り組みが行われている(Duso et al., 2004; Jaques et al., 2015; Funayama et al., 2015; 片山ら, 2018)。特に、*Euseius* 属カブリダニは花粉や植物を摂食する種でもあり(McMurtry and Croft, 1997; Ozawa and Yano, 2009; Adar et al., 2012; Cruz-Miralles et al., 2021)、海外のカンキツ園では花粉源を隣接させると樹上における密度が高まり、フシダニ類の密度を低下させることが知られている(Smith and Papacek, 1991; Palevsky et al., 2010; Maoz et al., 2014; Warburg et al., 2018)。また、より積極的な土着天敵の強化技術として、代替餌を人為的に散布して提供する方法(Wade et al., 2008)が知られている。海外ではホソバヒメガマ *Typha angustifolia* L.の花粉がカブリダニ製剤に対する栄養補助餌として商業的に販売されており、施設園芸作物や果樹では植物体にこの花粉を吹き付けることで、*Euseius* 属カブリダニの密度を高める手法が検討されている(Pijnakker et al., 2014, 2016; Van Houten, 2016; Beltrà et al., 2017)。本研究でも、カンキツ類やニホンナシの樹上に代替餌としてクロマツの花粉を散布することで害虫の低密度発生時からコウズケカブリダニの密度が高まり、さらに、本天敵の餌として好適でないミカンサビダニや不規則立体網を形成するカンザワハダニを防除できることが明らかになった。今後、コウズケカブリダニが持つ害虫防除効果をさらに強化する保全的生物的防除の確立のためには、「植物を用いた生息地管理」と「代替餌としての花粉の人為的な提供」のふた

つの天敵強化手法について、それぞれに適した植物種を選抜・評価し、G-IPMにおける実用性を確認する必要がある。

土着天敵を利用した害虫防除では、農業生態系に存在する天敵の個体群密度を制御する要因を解明することが重要である (Langellotto and Denno, 2004; Thomson et al., 2010)。果樹園において、栽培期間を通して複数種の害虫個体群を低密度に管理するためには、コウズケカブリダニが常に高密度で存在することが望ましい。しかし、前述したように、本天敵の樹上での密度は6月に最も高くなり、7月以降は急激に低下する。この現象は、カンキツおよびニホンナシのみならず、その他の樹木上でも共通して確認されている (Kasai et al., 2002; 増井・片山, 2017; 第2章, 第3章) が、その原因は明らかになっていない。コウズケカブリダニの発生ピークからクロマツの花粉溶液を1週間間隔でカンキツ樹上に散布しても、7月以降は本天敵の密度を維持できない (増井・土田, 未発表) ことから、餌の不足のみが原因とは考えられない。海外のカンキツ園における *Euseius* 属カブリダニの個体群動態は、春は増殖に適した気温であることから密度が高まるが、真夏は高温と乾燥により個体群が消滅するなど、気温の影響を受けることが知られている (Warburg et al., 2019)。一方、我が国のニホンナシ園やブドウ園では夏から秋にもコウズケカブリダニが発見される (Kishimoto, 2002; 望月, 2014)。これらのことから、本天敵の発生は温湿度や日長などの非生物的環境のみならず、樹種に依存する花外密線や糸状菌、微小昆虫などの生物的環境からも影響を受けている可能性がある。加えて、作物上の葉の表面構造はカブリダニ類の密度維持や捕食活動に影響を与えるため (Duso, 1992; Kreiter et al., 2002; Seelmann et al., 2007)、樹種だけでなく品種によってコウズケカブリダニによる害虫防除効果が異なる可能性がある。コウズケカブリダニの個体群動態を解明するためには、今後、園地内外の植生やそこから供給される代替餌の発生状況、対象樹種または品種における本天敵の生息場所の微小環境などもあわせて調査する必要がある。

農業生態系では生物多様性が高いほど害虫が発生しにくいとされる (Altieri, 1991; Gurr et al., 2003; Bianchi et al., 2006) が、広食性の天敵はギルド内捕食または共食いにより間接的に害虫防除効果を弱めることもある (Rosenheim et al., 2001; Snyder and Ives, 2001)。そのため、土着天敵を利用した生物防除では、

対象園地における広食性天敵の種構成やその季節消長を把握した上で、事前に種内および種間相互作用を評価することが重要である (Strong, 1992; Schmitz and Suttle, 2001)。特に、広食性のカブリダニは同種や異種のカブリダニを代替餌として利用することにより栄養上の利益を得ることができる (Schausberger and Croft, 2000a, b) ため、コウズケカブリダニによる害虫防除効果もギルド内捕食や共食いの影響を受ける可能性が高い。事実、コウズケカブリダニとニセラーゴカブリダニ、およびミカンサビダニをモデル害虫とした3者間のギルド内において、ニセラーゴカブリダニはコウズケカブリダニよりも強力なギルド内捕食者かつ共食い捕食者であり、ニセラーゴカブリダニによるギルド内捕食や共食いがカブリダニ全体の害虫防除効果を弱め、害虫の密度に対して間接的に正の効果をもたらす可能性が示された (第4章)。したがって、広食性の天敵の多様性を高めることは必ずしも生物防除を成功させるわけではない。

広食性天敵を効率的かつ効果的に利用した生物防除を実現するためには、ギルド内捕食や共食いといった害虫防除効果を弱める可能性のある現象を制御する必要がある。広食性カブリダニは花粉等の高品質な代替餌を提供することでギルド内捕食や共食いを緩和できることが知られており (Messelink et al., 2012; Negloh et al., 2012; Calabuig et al., 2018; Warburg et al., 2018; Marcossi et al., 2020)、本研究でもコウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニで同様のことが確認された。特に、コウズケカブリダニのギルド内捕食や共食いは花粉の存在下で大幅に抑制された (第4章)。したがって、コウズケカブリダニへの花粉の提供は、本天敵の個体群密度を上昇させるだけでなく、本天敵のギルド内捕食や共食いを大幅に緩和することで、餌として好適ではない害虫に対する防除効率を向上させた (第2章, 第3章, 第4章) と考えられる。一方、ニセラーゴカブリダニのギルド内捕食や共食いは花粉の存在下でも大幅には抑制されなかった (第4章)。したがって、ニセラーゴカブリダニに花粉を提供しても、本天敵のギルド内捕食や共食いは大幅には緩和せず、カブリダニ全体による害虫防除効果が向上しないだろう (第2章, 第3章, 第4章)。ただし、ニセラーゴカブリダニはミカンハダニを対象とした場合、代替餌を提供しなくても密度抑制に有効に働くことが示されており (Tanaka and Kashio, 1977)、対象樹種や害虫種、環境等の条件が適合すれば、

害虫防除に利用できる可能性も残されている。現状では、ニセラーゴカブリダニが優占種となる園地で、かつ本天敵の存在によりコウズケカブリダニの害虫防除効果が妨げられる場合には、化学的防除を基幹技術とした IPM に切り替える必要があるかもしれない。今後、コウズケカブリダニとニセラーゴカブリダニが相互に影響を及ぼさない条件を解明することで、2 種広食性カブリダニが持つ害虫防除効果を最大限に発揮させた、新たな G-IPM へと発展できるかもしれない。

農作物上では複数種の害虫が同時に発生して被害を及ぼすことから、今後は広食性の天敵が IPM の基幹的な役割を担うと考えられる。本研究では、広食性天敵の利用により、農作物の生産性の確保と複数種の害虫の薬剤抵抗性発達リスクの低減の両立が可能であることが確認された。さらに、花粉を散布するなど代替餌を人為

的に提供することで、生産者自らが広食性天敵の害虫防除効果を強化できる可能性が示された。一方、代替餌が存在する条件下においても広食性天敵の共食いおよびギルド内捕食が害虫防除効果を弱める可能性が示された。本研究では、果樹上で生活環が完結するダニ類を防除対象としたが、広食性天敵は害虫の発生前から作物上で個体群密度を高めることで防除効果を発揮することから、得られた知見を応用することで、周辺植生から作物上に侵入する害虫に対しても、その定着と増殖を防ぐことによる防除効果が期待される。

Table 9 Effects of pesticides on *Euseius sojaensis* adult female (modified from Tsuchida and Masui (2019))

Code ^a	Pesticides (Formulation) ^b	%AI	Dilution	Mortality (%)	Evaluation category ^c	Mean number of eggs ^d	Significant difference ^e
1A	Alanycarb (WP)	40.0	1,000	100	++	0	**
1B	DMTP (EC)	40.0	1,500	100	++	0	**
2B	Ethiprole (FL)	10.0	1,000	0	-	43	ns
3A	Bifenthrin (FL)	7.2	3,000	100	++	0	**
3A	fenpropathrin (EC)	10.0	2,000	86.7	+	2	**
4A	Acetamiprid (WSG)	20.0	2,000	10	-	2.3	**
4A	Clothianidin (SP)	16.0	2,000	6.7	-	6.3	**
4A	Dinotefuran (WSG)	20.0	1,000	3.3	-	6.7	**
4A	Imidacloprid (FL)	20.0	2,000	20	-	2.7	**
4A	Nytenpyram (SP)	10.0	1,000	36.7	±	3.7	**
4A	Thiamethoxam (WSG)	10.0	2,000	6.7	-	5	**
4C	Sulfoxaflor (FL)	9.5	1,000	0	-	14.7	**
5	Spinetoram (WDG)	25.0	5,000	100	++	6.3	**
5	Spinosad (FL)	20.0	4,000	3.3	-	24	**
6	Abamectin (EC)	1.8	3,000	100	++	0	**
6	Lepimectin (EC)	1.0	1,000	96.7	+	0	**
6	Milbemectin (WP)	2.0	2,000	100	++	2.7	**
9	Pyrifluquinazon (WDG)	20.0	3,000	0	-	51.3	ns
10A	Hexythiazox (WP)	10.0	2,000	0	-	32.3	*
10B	Etoxazole (FL)	10.0	2,000	6.7	-	47.7	ns
13	Chlorfenapyr (FL)	10.0	2,000	0	-	53.3	ns
15	Flufenoxuron (EC)	10.0	2,000	0	-	34.7	ns
15	Lufenuron (EC)	5.0	2,000	0	-	42.3	ns
16	Buprofezin (WP)	25.0	1,000	0	-	39	ns
19	Amitraz (EC)	20.0	1,000	100	++	0	**
20B	Acequinocyl (FL)	15.0	1,000	80	+	2.3	**
20D	Bifenazate (FL)	20.0	1,000	50	±	7	**
21A	Fenpyroximate (FL)	5.0	1,000	100	++	0	**
21A	Pyridaben (WP)	20.0	2,000	100	++	1.3	**
21A	Tolfenpyrad (FL)	15.0	1,000	100	++	0	**
23	Spirodiclofen (FL)	30.0	4,000	0	-	37	ns
23	Spiromesifen (FL)	30.0	2,000	0	-	39.3	ns
23	Spirotetramat (FL)	22.4	2,000	0	-	1	**
25A	Cyenoxyprafen (FL)	30.0	2,000	0	-	35.7	ns
25A	Cyflumetofen (FL)	20.0	1,000	0	-	37.7	ns
25B	Pyflubumide (FL)	20.0	2,000	0	-	49.7	ns
28	Cyantraniliprole (SE)	10.2	5,000	0	-	45.7	ns
28	Flubendiamide (FL)	18.0	4,000	0	-	36.3	ns
29	Flonicamid (DF)	50.0	1,000	0	-	43.3	ns
34	Flometoquin (FL)	10.0	2,000	0	-	52	ns
1	Thiophanate-methyl (WP)	70.0	1,000	0	-	5.7	**
3	Imibenconazole (DF)	30.0	4,000	16.7	-	37.7	ns
7	Boscalid (DF)	50.0	1,500	0	-	43	ns
9	Mepanipyrim (FL)	40.0	2,000	0	-	47	ns
11	Kresoxim-methyl (DF)	50.0	2,000	0	-	56.3	ns
11	Pyribencarb (WDG)	40.0	2,000	36.7	±	44.3	ns
21	Cyazofamid (FL)	9.4	2,000	0	-	42	ns
29	Fluazinam (SC)	50.0	2,000	0	-	10.7	**
M 01	Copper(II) hydroxide (DF)	46.1	2,000	0	-	50.7	ns
M 03	Mancozeb (WP)	80.0	1,000	60	±	5.3	**
M 09	Dithianon (FL)	42.0	1,000	13.3	-	42.3	ns
M 10	Quinoxaline (WP)	25.0	1,000	100	++	0	**
	Water	0		0	-	51.3	ns
	Control	0		0	-	51.3	-

^aInsecticides were classified based on the IRAC Mode of Action Classification Scheme (IRAC, 2022), and fungicides were classified based on the FRAC Code List 2022: Fungicides sorted by mode of action (FRAC, 2022)

^bDF: dry flowable, EC: emulsifiable concentrate, FL: flowable, SC: suspension concentrate, SE: suspo emulsion, SP: water soluble powder, WDG: water dispersible granule, WSG: water soluble granule, WP: wettable powder

^cTOBC/WPRS hazard assessment classes based on the mortality. - (not harmful): <30, ± (slightly harmful): 30-79, + (moderately harmful): 80-99, ++ (seriously harmful): 99-100 (Amano and Haseeb, 2001)

^dMean number of eggs laid by 10 females during 96h after pesticides treatment.

^eNumber of eggs laid by 10 females during 96h after pesticides treatment, were analyzed by Dunnett's test ("control" settled as control group) (** $P < 0.01$, * $P < 0.05$, ns: no significant difference)

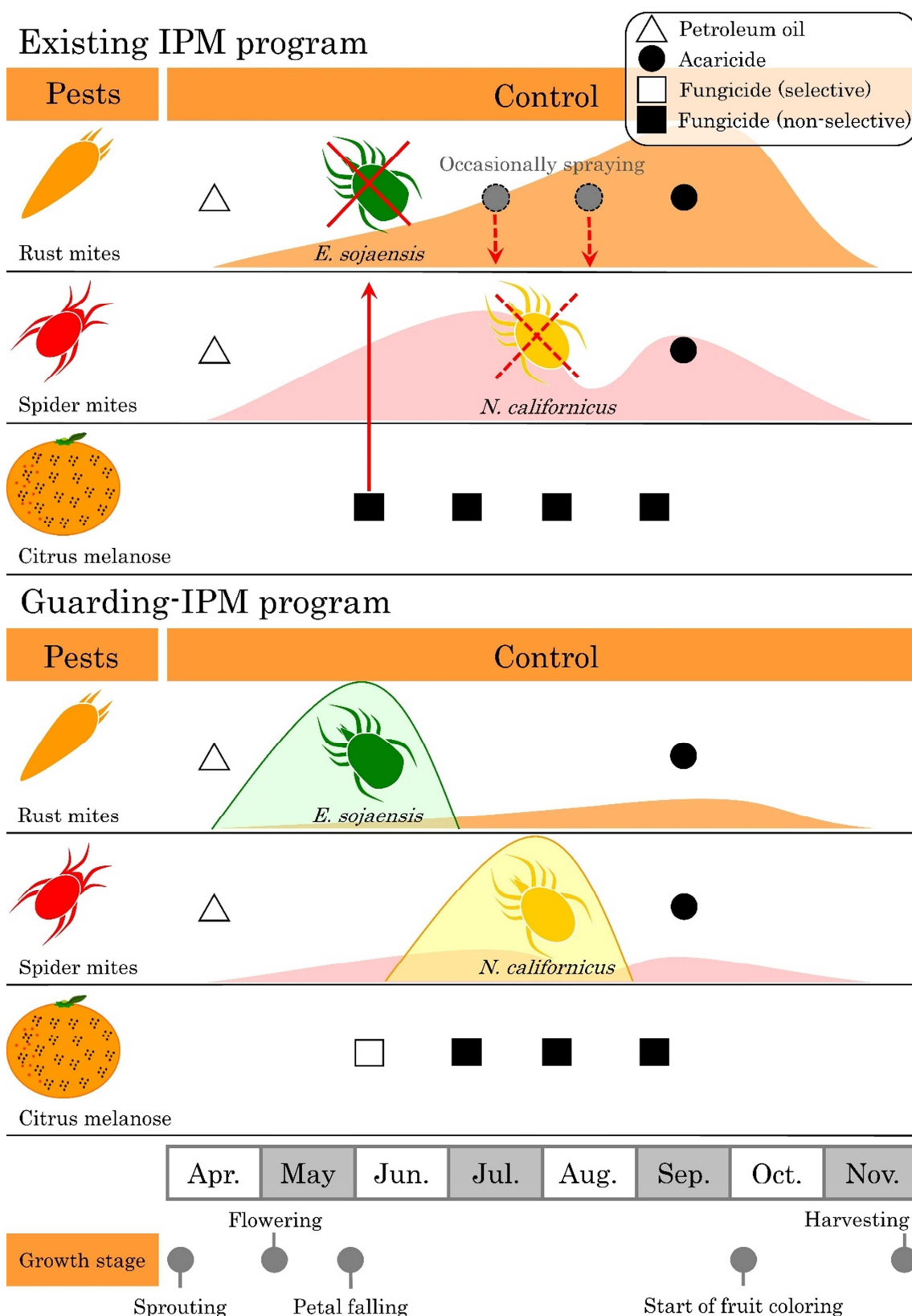


Fig. 18 Existing IPM (upper) and guarding IPM incorporating biological control with *Euseius sojaensis* (lower) for Satsuma mandarin. The combination of red arrows and crosses, with solid and broken lines indicate that pesticides have negative effects on phytoseiid mites

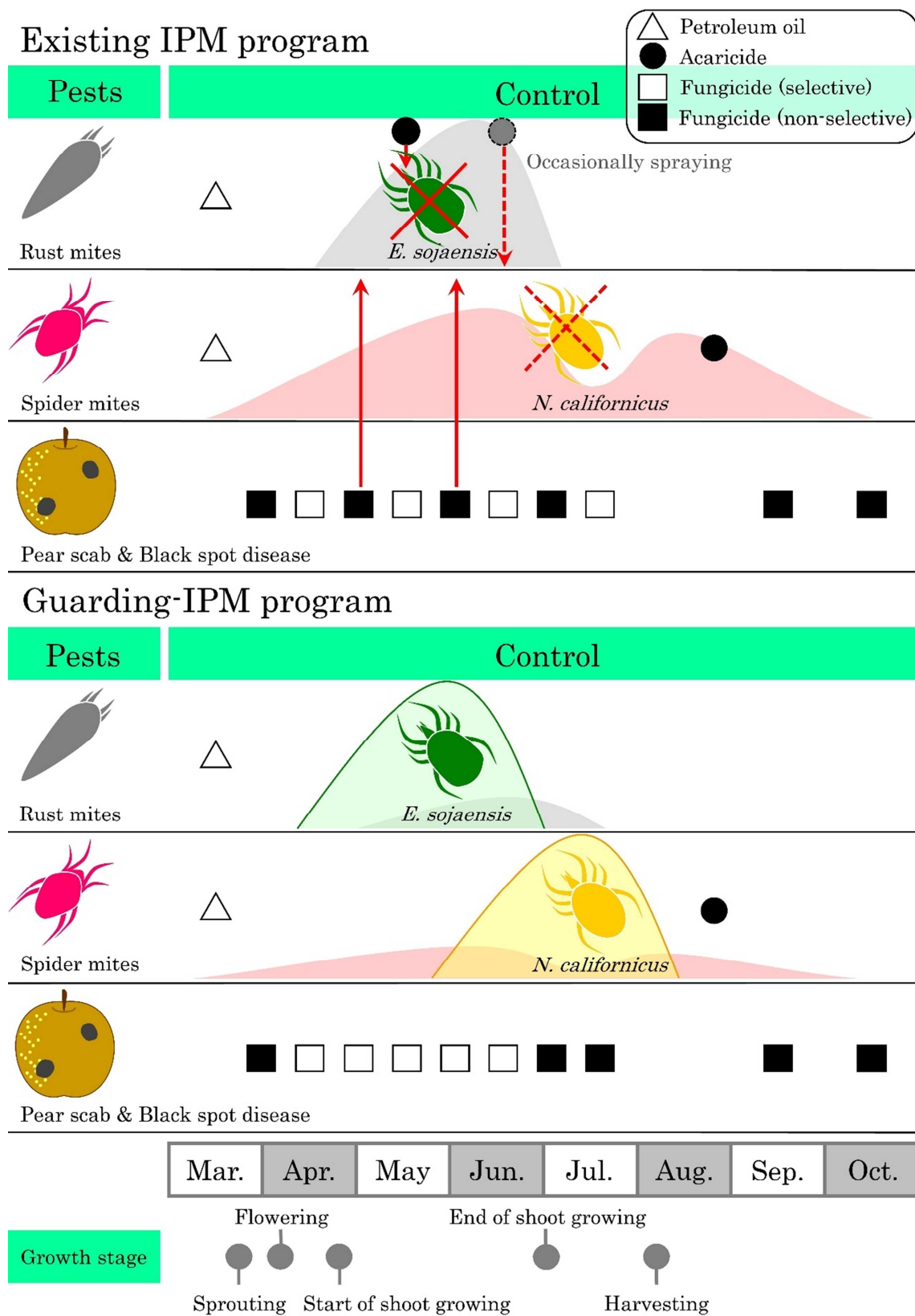


Fig. 19 Existing IPM (upper) and guarding IPM incorporating biological control with *Euseius sojaensis* (lower) for Japanese pear. The combination of red arrows and crosses, with solid and broken lines indicate that pesticides have negative effects on phytoseiid mites

摘 要

これまで、我が国の果樹における生物的防除では、特定の害虫種のみを対象とした狭食性の天敵が主に利用されてきた。そのため、標的外の害虫が多発した場合は化学農薬による防除に頼らざるを得ず、これにより天敵が排除され、総合的病害虫管理（IPM）の崩壊が引き起こされるという問題を抱えていた。そこで、本研究では、複数種の微小害虫を捕食可能な広食性の土着天敵であるコウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニの害虫防除における有効性について評価した。カンキツ類およびニホンナシにおける2種広食性カブリダニの害虫防除効果を評価し、高い効果が得られたコウズケカブリダニを利用したIPMの有効性を経済栽培園で検証した。さらに、広食性の天敵を利用した生物的防除では天敵の種内および種間相互作用によって害虫防除効果が弱まる可能性があるため、2種広食性カブリダニのギルド内捕食や共食いが害虫の個体群密度に及ぼす影響を評価した。これらの結果をもとに、コウズケカブリダニによる生物的防除を組み込んだ新たなIPMを提案するとともに、広食性カブリダニの害虫防除効果をより発揮させる生物的防除について考察した。

1. カンキツ園における広食性カブリダニによるミカンサビダニの生物的防除

(1) 広食性カブリダニのミカンサビダニに対する捕食能力

カンキツ類を加害するフシダニ類の一種であるミカンサビダニの密度と、コウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニの捕食量との関係を室内実験により調査した。ミカンサビダニに対する一日あたりの最大捕食量はコウズケカブリダニが約400匹、ニセラーゴカブリダニが約500匹と推定された。

(2) 広食性カブリダニへの代替餌としての花粉提供がミカンサビダニの生物的防除に及ぼす影響

室内実験および野外操作実験により、コウズケカブリダニもしくはニセラーゴカブリダニの放飼とこれら天敵の増殖に好適な高品質の代替餌である花粉の提供の有無を組み合わせ、ミカンサビダニの密度および果実被害抑制効果を評価した。室内実験では、コウズケカブリダニの放飼と花粉提供とを組み合わせることで本天敵

の個体数が増加し、その結果、ミカンサビダニの密度は花粉を提供しない場合よりも低く抑制された。野外実験では、コウズケカブリダニの放飼または花粉提供によりミカンサビダニの密度およびその被害が抑制された。

(3) 経済栽培カンキツ園におけるコウズケカブリダニによるミカンサビダニの生物的防除

経済栽培カンキツ園において、6月末までコウズケカブリダニに影響の小さい薬剤を使用して本天敵を保護するとともに、本天敵を放飼することによるミカンサビダニの防除効果を確認した。コウズケカブリダニ放飼区では無放飼区と比較してカブリダニ類の密度は高く、逆にミカンサビダニの密度および本害虫による被害率は低かった。

2. ニホンナシ園における広食性カブリダニによるニセナシサビダニおよびカンザワハダニの生物的防除

(1) 静岡県内のニホンナシ園に発生するカブリダニ二種の解明

静岡県の経済栽培園に生息するカブリダニの種を調査した結果、コウズケカブリダニ、ニセラーゴカブリダニ、チリカブリダニ、ミヤコカブリダニ、およびケナガカブリダニの5種が確認された。コウズケカブリダニは初夏までの発生であったが、ニセラーゴカブリダニは調査期間を通して発生し、優占種であった。ハダニ類を専門的に捕食する狭食性カブリダニであるチリカブリダニ、ミヤコカブリダニ、およびケナガカブリダニはハダニ類のコロニー内で多く確認された。

(2) ニホンナシにおける広食性カブリダニによるハダニ類発生抑制効果

コウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニが生息する無加温ガラス温室内のニホンナシにおいて、ハダニ類の一種であるカンザワハダニが低密度の段階からコウズケカブリダニを放飼する区、ニセラーゴカブリダニを放飼する区、天敵に影響の大きい殺虫剤を散布する天敵排除区、および無放飼区を設け、これら4処理区における広食性カブリダニによる本害虫の発生抑制効果を評価した。全ての処理区に広食性カブリダニの増殖に好適な代替餌として花粉を提供した。その結果、コウズケカブリダニ放飼区および無放飼区ではコウズケカブリダニが優占種であり、これら2処理区におけるカン

ザワハダニの密度はニセラーゴカブリダニ放飼区および天敵排除区と比較して有意に低かった。

(3) 経済栽培ニホンナシ園におけるコウズケカブリダニによるニセナシサビダニおよびカンザワハダニの生物的防除

経済栽培ニホンナシ園において、6月末までコウズケカブリダニに影響の小さい薬剤を使用して本天敵を保護するとともに、本天敵を放飼することにより、フシダニ類の一種であるニセナシサビダニおよびカンザワハダニの防除効果を確認した。コウズケカブリダニ放飼区では無放飼区と比較してカブリダニの密度は高く、逆にニセナシサビダニの密度と本害虫による被害率率、およびカンザワハダニの密度は低かった。

3. 高品質な代替餌の存在下における2種広食性カブリダニのギルド内捕食および共食いがミカンサビダニの生物的防除に及ぼす影響

広食性カブリダニの増殖に好適な代替餌である花粉の存在下と非存在下において、コウズケカブリダニおよびニセラーゴカブリダニのギルド内捕食および共食いの強度を比較した。花粉の有無にかかわらず、ニセラーゴカブリダニはコウズケカブリダニよりもギルド内捕食および共食いの強度が高かった。花粉の存在下では非存在下と比較して両種のギルド内捕食および共食いが緩和されたが、ニセラーゴカブリダニのギルド内捕食および共食いはコウズケカブリダニのそれらと比較して緩和の程度は低かった。次に、花粉の存在下でコウズケカブリダニとニセラーゴカブリダニの放飼比率を変えることにより、2種広食性カブリダニのギルド内捕食および共食いがミカンサビダニの個体群密度に及ぼす影響を調査した。コウズケカブリダニ単独放飼区ではコウズケカブリダニの個体数が増加し、ミカンサビダニが防

除された。しかし、ニセラーゴカブリダニ単独放飼区ではニセラーゴカブリダニの個体数は少なく、ミカンサビダニは防除されなかった。さらに、これら2種を同時に放飼した場合、ニセラーゴカブリダニの放飼比率が高いとカブリダニ全体の個体数は少なく、また、ミカンサビダニの密度は高かった。

本研究では、果樹園に生息する2種広食性カブリダニのうち、コウズケカブリダニがフシダニ類の防除に有効な種であることを初めて明らかにした。本天敵は様々な樹種において春に増殖を開始し、初夏に発生ピークを示す。このことから、春から初夏の主要病害虫を対象とした防除にはコウズケカブリダニに影響の小さい薬剤を使用することで、多様な樹種で本天敵による生物的防除を組み込んだIPMを構築できるものと考えられる。さらに、害虫の低密度発生時におけるコウズケカブリダニの放飼増強や本天敵への花粉の提供により、害虫の多発前から本天敵の密度が高まる結果、害虫防除効果が強化されることを明らかにした。花粉の提供はコウズケカブリダニの共食いを大幅に緩和することから、本天敵による防除効率を向上させた可能性がある。一方、ニセラーゴカブリダニとコウズケカブリダニが同時に存在する場合、たとえ花粉が提供される条件下でも、ニセラーゴカブリダニによるギルド内捕食や共食いによってカブリダニ全体の密度が高まらず、害虫防除効果が弱まる可能性がある。このことは、農業生態系に生息する広食性天敵の多様性を高めることが必ずしも生物的防除を成功させるわけではないことを示している。本研究で得られた知見は、有用な広食性天敵の害虫防除効果をより発揮させる生物的防除を実践するにあたって広く活用できると考えられる。

謝 辞

本論文を取りまとめるにあたり、懇切なご指導とご鞭撻を賜った静岡大学農学部准教授笠井 敦博士に深謝の意を表す。本研究の遂行にあたり、静岡県農林技術研究所果樹研究センター増井伸一博士には終始丁寧なご指導とご助言を賜った。また、岐阜大学応用生物科学部教授土田浩治博士、静岡大学農学部教授稲垣栄洋博士には本論文の審査を賜った。あわせて深謝の意を表す。

農研機構植物防疫研究部門果樹茶病害虫防除研究領域岸本英成博士にはカブリダニの種同定方法や調査手法を研修させていただくとともに、有益なご助言や文献等の情報をいただいた。厚く感謝の意を表す。

本研究を経済栽培園で実施するにあたり、カンキツ生産者杉山達哉氏、真野 滋氏、ニホンナシ生産者曾根健治氏、大畑里志氏には試験園地の管理等について多大なご協力を賜った。また、南駿農業協同組合武 剛広氏、大井川農業協同組合杉本悠太郎氏には試験園地の調整および野外調査にご協力を賜った。あわせて厚く感謝申し上げる。

農研機構植物防疫研究部門果樹茶病害虫防除研究領域外山晶敏博士、檜垣守男博士、同機構果樹茶業研究部門カンキツ研究領域望月雅俊博士、同機構北海道農業研究センター研究推進部豊島真吾博士、同機構東北農業研究センター生産環境研究領域下田武志博士、同機構中央農業研究センター虫・鳥獣害研究領域光永貴之博士、京都大学大学院農学研究科教授日本典秀博士、元同大学大学院農学研究科准教授刑部正博博士、宇都宮大学農学部教授園田昌司博士、法政大学植物医科学センター上遠野富士夫博士、同大学生命科学部教授大井田 寛博士、秋田県果樹試験場舟山 健博士、千葉県農業総合研究センター清水 健博士、大阪府立環境農林水産総合研究所金子修治博士、柴尾 学博士には、本研究の実施にあたり、適切なご助言や励ましの言葉をいただいた。あわせて厚く感謝申し上げる。

元静岡大学農学部教授西東 力博士、同大学農学部准教授田上陽介博士、元静岡県病害虫防除所長池田二三高氏、元同県柑橘試験場長古橋嘉一博士、元同県農林技術研究所果樹研究センター長市川 健氏、元同県農林技術研究所果樹研究センター影山智津子博士、静岡県立農林環境専門職大学生産環境経営学部教授多々良明夫博士、佐藤展之博士、小澤朗人博士、杉山恵太郎博士、外側正之博士、同大学短期大学部教授竹内 隆氏、稲葉善太郎博士には、研究に対する姿勢をご教示いただくとともに励ましの言葉をいただいた。静岡県農林技術研究所果樹研究センターの皆様をはじめ、同県農林技術研究所の皆様、同県病害虫関係の皆様には普段から本研究の遂行を支えていただいた。あわせて厚くお礼申し上げます。また、本研究において、供試虫の飼育や室内調査にご協力いただいた静岡県植物防疫協会望月小百合氏および野外調査にご協力いただいた元静岡県立農林大学校果樹分校の学生諸氏に厚くお礼申し上げます。

引用文献

- Adar, E., M. Inbar, S. Gal, N. Doron, Z. Q. Zhang and E. Palevsky (2012) Plant-feeding and non-plant feeding phytoseiids: differences in behavior and cheliceral morphology. *Exp. Appl. Acarol.* 58: 341–357.
- Altieri, M. A. (1991) How best can we use biodiversity in agroecosystems. *Outlook on Agriculture* 20: 15–23.
- 天野 洋 (1999) わが国におけるカブリダニ類研究の現状と将来. 日本ダニ学会 8: 1–7. [Amano, H. (1999) Recent advances in studies on domestic predacious phytoseiid mites in Japan. *J. Acarol. Soc. Jpn.* 8: 1–7.]
- Amano, H. (2001) Species structure and abundance of invertebrate natural enemies in sustainable agroecosystems. In: Shiyomi, M. and H. Koizumi (eds.) *Structure and Function in Agroecosystem Design and Management*. CRC press, Boca Raton. pp 167–182.
- Amano, H. and M. Haseeb (2001) Recently-proposed methods and concepts of testing the effects of pesticides on the beneficial mite and insect species: study limitations and implications in IPM. *Appl. Entomol. Zool.* 36: 1–11.
- 荒川昭弘・岡崎一博 (2002) 交信かく乱法による落葉果樹害虫防除と天敵の役割. 植物防疫 56: 97–101. [Arakawa, H. and K. Okazaki (2002) Management of deciduous fruit tree pests by using mating disruptants and natural enemies. *Plant Prot.* 56: 97–101.]
- Arysta Life Science (2021) スワルスキー®プラス, スワルスキー®プラス UM. https://arystalifescience.jp/catalog/p_swalskiplus.php (accessed December, 2021)
- 芦原 亘 (2001) ミカンサビダニの生態と防除. 植物防疫 55: 367–370. [Ashihara, W. (2001) Biology and control of the pink citrus rust mite, *Aculops pelekassi*. *Plant Prot.* 55: 367–370.]
- Ashihara, W., A. Kondo, M. Shibao, H. Tanaka, K. Hiehata and K. Izumi (2004) Ecology and control of eriophyid mites injurious to fruit trees in Japan. *JARQ* 38: 31–41.
- Barbosa, P. A. (ed.) (1998) *Conservation Biological Control*. Academic Press, San Diego. 396 pp.
- Beltrà, A., A. Calabuig, C. Navarro-Campos, M. José Ramírez-Soria, A. Soto, F. Garcia-Marí, F. L. Wäckers and A. Pekas (2017) Provisioning of food supplements enhances the conservation of phytoseiid mites in citrus. *Biol. Control* 115: 18–22.
- Bianchi, F. C., J. H. Booij and T. Tschamntke (2006) Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proc. R. Soc. B* 273: 1715–1727.
- Calabuig, A., A. Pekas and F. L. Wäckers (2018) The quality of nonprey food affects cannibalism, intraguild predation, and hyperpredation in two species of phytoseiid mites. *J. Econ. Entomol.* 111: 72–77.
- Calvo, F. J., K. Bolckmans and J. E. Belda (2011) Control of *Bemisia tabaci* and *Frankliniella occidentalis* in cucumber by *Amblyseius swirskii*. *BioControl* 56: 185–192.
- 千葉県農林水産部 (2020) ニホンナシにおける天敵カブリダニを主体としたハダニ類の IPM 防除マニュアル. <https://www.pref.chiba.lg.jp/annou/document/s/nashiipm.pdf> (accessed December, 2021)
- Cruz-Miralles, J., M. Cabedo-López, M. Guzzo, M. V. Ibáñez-Gual, V. Flors and J. A. Jaques (2021) Plant-feeding may explain why the generalist predator *Euseius stipulatus* does better on less defended citrus plants but *Tetranychus*-specialists *Neoseiulus californicus* and *Phytoseiulus persimilis* do not. *Exp. Appl. Acarol.* 83: 167–182.
- Duso, C. (1992) Role of *Amblyseius aberrans* (Oud.), *Typhlodromus pyri* Scheuten and *Amblyseius andersoni* (Chant) (Acari, Phytoseiidae) in vineyards. III. Influence of variety characteristics on the success of *A. aberrans* and *T. pyri* releases. *J. Appl. Entomol.* 114: 455–462.
- Duso, C., V. Malagnini, A. Paganelli, L. Aldegheri, M. Bottini and S. Otto (2004) Pollen availability and

- abundance of predatory phytoseiid mites on natural and secondary hedgerows. *BioControl* 49: 397–415.
- Dutcher, J. D. (2007) A review of resurgence and replacement causing pest outbreaks in IPM. In: Ciancio, A. and K. G. Mukerji (eds.) *General Concepts in Integrated Pest and Disease Management*. Springer, Netherlands. pp 27–43.
- 江原昭三 (編) (1993) 日本原色植物ダニ図鑑. 全国農村教育協会, 東京. 298 pp. [Ehara, S. (ed.) (1993) *Plant Mites of Japan in Colors*. Zenkoku Noson Kyoiku Kykai, Tokyo. 298 pp.]
- 江原昭三・真梶徳純 (編) (1996) 植物ダニ学. 全国農村教育協会, 東京. 419 pp. [Ehara, S. and N. Shinkaji (eds.) (1996) *Principles of Plant Acarology*. Zenkoku Noson Kyoiku Kykai, Tokyo. 419 pp.]
- Evans, E. W., A. T. Stevenson and D. R. Richards (1999) Essential versus alternative foods of insect predators: benefits of a mixed diet. *Oecologia* 121: 107–112.
- Finke, D. L. and R. F. Denno (2003) Intra-guild predation relaxes natural enemy impacts on herbivore populations. *Ecol. Entomol.* 28: 67–73.
- Finke, D. L. and R. F. Denno (2004) Predator diversity dampens trophic cascades. *Nature* 429: 407–410.
- FRAC (2022) FRAC Code List® 2022: Fungal control agents sorted by cross-resistance pattern and mode of action. https://www.frac.info/docs/default-source/publications/frac-code-list/frac-code-list-2022-final.pdf?sfvrsn=b6024e9a_2 (accessed May, 2022)
- 福田 寛 (1989) ニセナシサビダニによるナシ葉の被害. 関東病虫研報 36: 194–195.
- 舟山 健 (2010) 秋田県のリンド園における合成ピレスロイド系殺虫剤感受性が低下したケナガカブリダニの発生. 応動昆 54: 208–211. [Funayama, K. (2010) Occurrence of pyrethroid-resistant individuals of the indigenous predatory mite, *Neoseiulus womersleyi* (Schicha) (Acari: Phytoseiidae), in apple orchards of Akita Prefecture in Northern Japan. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 54: 208–211.]
- Funayama, K. (2015) Outbreaks of the two-spotted spider mite, *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) are caused by broad-spectrum insecticide spraying in apple orchards. *Appl. Entomol. Zool.* 50: 169–174.
- 舟山 健・高橋佑治 (1993) リンゴサビダニの防除と管理に関する研究 第1報 薬剤防除とカブリダニ類に対する交替餌としての評価. 秋果試研報 23: 1–13. [Funayama, K. and Y. Takahashi (1993) Studies on control and management of apple rust mite, *Aculus schlechtendali* (Nalepa). I Chemical control and valuation as alternative food for predatory mites. *Bull. Akita. Fruit-Tree Exp. Stn.* 23: 1–13.]
- Funayama, K., M. Komatsu, S. Sonoda, I. Takahashi and K. Hara (2015) Management of apple orchards to conserve generalist phytoseiid mites suppresses two-spotted spider mite, *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae). *Exp. Appl. Acarol.* 65: 43–54.
- Furuhashi, K. (1990) Resurgence of citrus red mite, *Panonychus citri* McGregor induced by synthetic pyrethroids. *Jpn. Pestic. Info.* 57: 91–96.
- Furuhashi, K. and M. Nishino (1983) Biological control of arrowhead scale, *Unaspis yanonensis*, by parasitic wasps introduced from the People's Republic of China. *Entomophaga* 28: 277–286.
- 古橋嘉一・西野 操 (1994) 中国からの導入天敵によるヤノネカイガラムシの生物的防除法に関する研究. 静岡柑試特報 6: 1–65. [Furuhashi, K. and M. Nishino (1994) Biological control of arrowhead scale *Unaspis yanonensis* Kuwana by natural enemies introduced from the People's Republic of China. *Spec. Bull. Shizuoka Citrus Exp. Stn.* 6: 1–65.]
- Ghasemzadeh, S., A. Leman and G. J. Messelink (2017) Biological control of *Echinothrips americanus* by phytoseiid predatory mites and the effect of pollen as supplemental food. *Exp. Appl. Acarol.* 73: 209–221.
- Gillepie, D. R. (1989) Biological control of thrips [Thysanoptera: Thripidae] on greenhouse cucumber by *Amblyseius cucumeris*. *Entomophaga* 34: 185–192.

- Gotoh, T., K. Yamaguchi and K. Mori (2004) Effect of temperature on life history of the predatory mite *Amblyseius (Neoseiulus) californicus* (Acari: Phytoseiidae). *Exp. Appl. Acarol.* 32: 15–30.
- Grafton-Cardwell, E. E. and Y. Ouyang (1995) Augmentation of *Euseius tularensis* (Acari: Phytoseiidae) in Citrus. *Environ. Entomol.* 24: 738–747.
- Gross, K. and J. A. Rosenheim (2011) Quantifying secondary pest outbreaks in cotton and their monetary cost with causal-inference statistics. *Ecol. Applic.* 21: 2770–2780.
- Gurr, G. M., S. D. Wratten and J. M. Luna (2003) Multi-function agricultural biodiversity: pest management and other benefits. *Basic Appl. Ecol.* 4: 107–116.
- Gurr, G. M., S. D. Wratten and M. A. Altieri (eds.) (2004). *Ecological Engineering for Pest Management: Advances in Habitat Manipulation for Arthropods*. CSIRO, Collingwood. 244pp.
- Guzmán, C., R. M. Sahún and M. Montserrat (2016) Intraguild predation between phytoseiid mite species might not be so common. *Exp. Appl. Acarol.* 68: 441–453.
- 行徳 裕・柏尾具俊 (1990) ケシハネカクシ類成虫に対する農薬の影響. 九病虫研会報 36: 155–159. [Gyoutoku, Y. and T. Kashio (1990) Toxicity of pesticides on the *Oligota* spp. (Coleoptera: Staphylinidae). *Proc. Assoc. Pl. Prot. Kyushu* 36: 155–159.]
- 浜村徹三・芦原 亘・井上晃一・真梶徳純 (1984) 新植ウンシュウミカン園の薬剤散布・無散布区における害虫及び天敵相と樹の生育. 果樹試報 E5: 77–106. [Hamamura, T., W. Ashihara, K. Inoue and N. Shinkaji (1984) Annual and seasonal changes of the arthropod fauna and growth of tree in newly planted Satsuma mandarin groves treated and untreated with pesticides during nine years. *Bull. Fruit Tree Res. Stn.* E5: 77–106.]
- Helle, W. and M. W. Sabelis (1985) *Spider mites: Their biology, natural enemies, and control*. Vol. 1A, 1B. Elsevier, Amsterdam. v. 1A 405 pp, v. 1B 458 pp.
- Holling, C. S. (1959) Some characteristics of simple types of predation and parasitism. *Can. Entomol.* 91: 385–398.
- Howarth, F. G. (1991) Environmental impacts of classical biological control. *Ann. Rev. Entomol.* 36: 485–509.
- Hoyt, S. C. (1969) Integrated chemical control of insects and biological control of mites on apple in Washington. *J. Econ. Entomol.* 62: 74–86.
- 井村岳男 (2013) 数種殺虫剤のニジュウヤホシテントウに対する防除効果と ヒメハナカメムシ類に対する影響. 関西病虫研報 55: 7–11. [Imura, T. (2013) Insecticide effects on the twenty-eight-spotted ladybird and *Orius* spp. *Ann. Rept. Kansai Pl. Prot.* 55: 7–11.]
- 井上晃一・刑部正博・芦原 亘・浜村徹三 (1986) ガラス室栽培ブドウにおけるカンザワハダニの発生要因の解析. 果樹試報 E6: 103–116. [Inoue, K., M. Osakabe, W. Ashihara and T. Hamamura (1986) Factors affecting abundance of the Kanzawa spider mite, *Tetranychus kanzawai* Kishida on grapevine in a greenhouse. *Bull. Fruit Tree Res. Stn.* E6: 103–116.]
- 井沼 崇 (2017) カンキツ黒点病に対する各種薬剤の防除効果. 和歌山農林水研報 5: 47–60. [Inuma, T. (2017) Control effect of several pesticides for citrus melanose. *Bull. Wakayama Exp. Sta. Agric. For. Fish.* 5: 47–60.]
- IRAC (2022) IRAC Mode of Action Classification Scheme. <https://irac-online.org/modes-of-action/> (accessed May, 2022)
- Ishii, H., Y. Mikawa, Y. Murase, S. Sonoda, N. Hinomoto, H. Kishimoto, S. Toyoshima and M. Toyama (2018) Species composition and arthropod pest feeding of phytoseiid mites in a Japanese pear greenhouse. *Appl. Entomol. Zool.* 53: 463–474.
- 伊澤宏毅 (1990) ナシに寄生するクワコナカイガラムシの防除対策. 植物防疫 44: 260–263. [Izawa, H. (2000) Ecology and control of the Comstock mealybug on Japanese pear. *Plant Prot.* 44: 260–263.]
- 伊澤宏毅 (2000) ニホンナシにおけるニセナシサビダニの季節的消長と要防除水準. 応動昆 44: 130–133. [Izawa, H. (2000) Seasonal changes and control

- threshold of *Eriophyes chibaensis* Kadono on Japanese pear cv. Nijisseiki. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 44: 130–133.]
- 伊澤宏毅 (2001) ニセナシサビダニの発生と防除. 植物防疫 55: 361–366. [Izawa, H. (2001) Ecology and control of *Eriophyes chibaensis* Kadono on Japanese pear. *Plant Prot.* 55: 361–366.]
- 伊澤宏毅・藤井和則・的場達矢 (2000) 複合交信攪乱剤を用いたナシ害虫防除における殺虫剤削減の試み. 応動昆 44: 165–171. [Izawa, H., K. Fujii and T. Matoba (2000) Control multiple species of lepidopterous insect pest using a mating disruptor and reduced pesticide application in Japanese pear orchards. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 44: 165–171.]
- Janssen, A. and M. W. Sabelis (2015) Alternative food and biological control by generalist predatory mites: the case of *Amblyseius swirskii*. *Exp. Appl. Acarol.* 65: 413–418.
- Janssen, A., A. Pallini, M. Venzon and M. W. Sabelis (1998) Behaviour and indirect interactions in food webs of plant-inhabiting arthropods. *Exp. Appl. Acarol.* 22: 497–521.
- Janssen, A., M. Montserrat, R. HilleRisLambers, A. M. Roos, A. Pallini and M. W. Sabelis (2006) Intraguild predation usually does not disrupt biological control. In: Brodeur, J. and G. Boivin (eds.) *Trophic and Guild Interactions in Biological Control*. Springer, Dordrecht. pp 21–44.
- Jaques, J. A., E. Aguilar-Fenollosa, M. A. Hurtado-Ruiz and T. Pina (2015) Food web engineering to enhance biological control of *Tetranychus urticae* by phytoseiid mites (Tetranychidae: Phytoseiidae) in citrus. In: Carrillo, D., G. J. de Moraes and J. E. Peña (eds.) *Prospects for Biological Control of Plant Feeding Mites and Other Harmful Organisms*. Springer, Dordrecht. pp 251–269.
- Ji, J., Y. Zhang, J. Wang, J. Lin, L. Sun, X. Chen, K. Ito and Y. Saito (2015) Can the predatory mites *Amblyseius swirskii* and *Amblyseius eharai* reproduce by feeding solely upon conspecific or heterospecific eggs (Acari: Phytoseiidae)? *Appl. Entomol. Zool.* 50: 149–154.
- 上遠野富士夫 (1995) 日本における木本寄生性フシダニ類の分類学的研究とナシ寄生性ニセナシサビダニの生態学的研究. 千葉農試特報 30: 1–87. [Kadono, F. (1995) Taxonomic studies on eriophyid mites on trees in Japan and ecological studies on the Japanese pear rust mite, *Eriophyes chibaensis* Kadono on pear trees (Acari: Eriophyoidea). *Spec. Bull. Chiba Agric. Exp. Stn.* 30: 1–87.]
- 上遠野富士夫 (2003) フシダニの分類と生態. 植物防疫 57: 397–401. [Kadono, F. (2003) Taxonomy and biology of eriophyoid mites. *Plant Prot.* 57: 397–401.]
- 上遠野富士夫・藤代 肇・椎名賢子・藤家 梓 (1982) 千葉県におけるニセナシサビダニ *Eriophyes chibaensis* Kadono の季節的発生消長. 応動昆 26: 213–217. [Kadono, F., H. Fujishiro, M. Shiina and A. Fujiie (1995) Seasonal population trends of the Japanese pear rust mite, *Eriophyes chibaensis* Kadono (Acarina: Eriophidae) on pear trees in Chiba. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 26: 213–217.]
- 柿元一樹 (2020) ナスコナカイガラムシ (カメムシ目: コナカイガラムシ科) の殺虫剤評価手法および有効薬剤. 応動昆 64: 183–191. [Kakimoto, K. (2020) Effectiveness of available insecticides against the solanum mealybug, *Phenacoccus solani* (Hemiptera: Pseudococcidae). *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 64: 183–191.]
- 柿元一樹・井口拓士・井上栄明・櫛下町鉦敏 (2004) アザミウマ類に対するニセラーゴカブリダニの捕食能力. 九病虫研会報 50: 82–87. [Kakimoto, K., T. Iguchi, H. Inoue and K. Kushigemati (2004) Predatory ability of *Amblyseius eharai* Amitai et Swirski (Acari: Phytoseiidae) on thrips. *Kyushu Pl. Prot. Res.* 50: 82–87.]
- Kasai, A., S. Yano and A. Takafuji (2002) Density of the eriophyoid mites inhabiting the domatia of *Cinnamomum camphora* Linn. affects the density of the predatory mite, *Amblyseius sojaensis* Ehara (Acari: Phytoseiidae), not inhabiting the domatia. *Appl. Entomol. Zool.* 37: 617–619.
- Kasai, A., S. Yano and A. Takafuji (2005) Prey-predator mutualism in a tritrophic system on a camphor tree. *Ecol. Res.* 20: 163–166.

- Katayama, H., S. Masui, M. Tsuchiya, A. Tatara, M. Doi, S. Kaneko and T. Saito (2006) Density suppression of the citrus red mite *Panonychus citri* (Acari: Tetranychidae) due to the occurrence of *Neoseiulus californicus* (McGregor) (Acari: Phytoseiidae) on Satsuma mandarin. *Appl. Entomol. Zool.* 41: 679–684.
- 片山晴喜・多々良明夫・土井 誠・金子修治・西東 力 (2012) 静岡県のカンキツ園に発生するミヤコカブリダニの薬剤感受性. 関西病虫研報 54: 187–189. [Katayama, H., A. Tatara, M. Doi, S. Kaneko and T. Saito (2012) Pesticide susceptibility of a population of *Neoseiulus californicus* (McGregor) at citrus grove in Shizuoka Prefecture. *Ann. Rept. Kansai Pl. Prot.* 54: 187–189.]
- 加藤 勉 (1977) ミカンサビダニの時期別加害によるミカン果実の品質変化. 山口農試研報 28: 129–137. [Kato, T. (1977) Qualitative change of Satsuma mandarin fruits infested with the Japanese citrus rust mite, *Aculops pelekassi* (Keifer). *Bull. Yamaguchi Agric. Expt. Stn.* 28: 129–137.]
- Kishimoto, H. (2002) Species composition and seasonal occurrence of spider mites (Acari: Tetranychidae) and their predators in Japanese pear orchards with different agrochemical spraying programs. *Appl. Entomol. Zool.* 37: 603–615.
- Kishimoto, H. (2005) A new technique for efficient rearing of phytoseiid mites. *Appl. Entomol. Zool.* 40: 77–81.
- Kishimoto, H. (2014) Development and oviposition of six native phytoseiid species (Acari: Phytoseiidae) reared on pink citrus rust mite, *Aculops pelekassi* (Keifer) (Acari: Eriophyidae). *J. Acarol. Soc. Jpn.* 23: 71–77.
- 岸本英成・手柴真弓・近藤知弥・宮崎俊英・杉浦直幸・戸田世嗣・山玩礼一・若月 洋・本山 宏・堀江宏彰 (2007) 九州のカンキツ園におけるミヤコカブリダニの発生状況. 日本ダニ学会誌 16: 129–137. [Kishimoto, H., M. Teshiba, T. Kondoh, T. Miyazaki, N. Sugiura, S. Toda, R. Yamasaki, H. Wakatsuki, H. Motoyama and H. Horie (2007) Occurrence of *Neoseiulus californicus* (Acari: Phytoseiidae) on citrus in the Kyushu district, Japan. *J. Acarol. Soc. Jpn.* 16: 129–137.]
- Kishimoto, H., Y. Ohira and I. Adachi (2014) Effect of different plant pollens on the development and oviposition of seven native phytoseiid species (Acari: Phytoseiidae) in Japan. *Appl. Entomol. Zool.* 49: 19–25.
- 岸本英成・柳沼勝彦・外山晶敏 (2018) 土着広食性カブリダニ 4 種 (ダニ目: カブリダニ科) に対する各種殺虫剤の影響. 応動昆 62: 29–39. [Kishimoto, H., K. Yaginuma and M. Toyama (2018) Effects of pesticides on four native generalist phytoseiid species (Acari: Phytoseiidae). *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 62: 29–39.]
- 岸本英成・柳沼勝彦・降幡駿介・伊藤 伝・八重樫 元・外山晶敏 (2020) 土着広食性カブリダニ 4 種 (ダニ目: カブリダニ科) に対する各種殺菌剤の影響. 応動昆 64: 175–182. [Kishimoto, H., K. Yaginuma, S. Furihata, T. Ito, H. Yaegashi and M. Toyama (2020) Effects of fungicides on four native generalist phytoseiid species (Acari: Phytoseiidae). *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 64: 175–182.]
- 小池 朗・根本 久・天野 洋 (2000) カブリダニ捕獲トラップ (Phyto trap) の開発およびその利用によるナン樹上のカブリダニ種構成と発生消長の調査. 応動昆 44: 35–40. [Koike, A., H. Nemoto and H. Amano (2000) New trap for survey of species structure and seasonal dynamics of phytoseiid mites on Japanese pear trees (Acari: Phytoseiidae). *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 44: 35–40.]
- Kondo, A. and T. Hiramatsu (1999a) Predatory ability of two species of phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae) on the peach silver mite, *Aculus fockeui* (Nalepa et Trouessart) (Acari: Eriophyidae). *Appl. Entomol. Zool.* 34: 485–487.
- Kondo, A. and T. Hiramatsu (1999b) Resurgence of the peach silver mite, *Aculus fockeui* (Nalepa et Trouessart) (Acari: Eriophyidae), induced by a synthetic pyrethroid fluvalinate. *Appl. Entomol. Zool.* 34: 531–535.
- Kreiter, S., M.-S. Tixier, B. A. Croft, P. Auger and D. Barret (2002) Plant and leaf characteristics influencing the predaceous mite *Kampimodromus aberrans* (Acari: Phytoseiidae)

- in habitats surrounding vineyards. *Environ. Entomol.* 31: 648–660.
- 久保田健嗣 (2020) ナシの退緑斑点症状に対するニセナシサビダニおよびウイルスの関与. 果実日本 75: 64–66.
- Kubota, K., Y. Chiaki, H. Yanagisawa, S. Takeyama, R. Suzuki, M. Kohyama, T. Horikawa, S. Toda and F. Kadono (2021) First report of pear chlorotic leaf spot-associated virus on Japanese and European pears in Japan and its detection from an eriophyid mite. *Plant Dis.* 105: 1234.
- 草間直人・山中 聡 (2020) 全国における IPM 体系の確立と普及に向けた普及指導機関からのアプローチ. 応 動 昆 64: 93–106. [Kusama, N. and S. Yamanaka (2020) Approach to an extension organization for the establishment and dissemination of an IPM program using natural enemies in Japanese agriculture. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 64: 93–106.]
- Landis, D. A., S. D. Wratten and G. M. Gurr (2000) Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Ann. Rev. Entomol.* 45: 175–201.
- Langellotto, G. A. and R. F. Denno (2004) Responses of invertebrate natural enemies to complex-structured habitats: a meta-analytical synthesis. *Oecologia* 139: 1–10.
- Lindquist, E. E., M. W. Sabelis and J. Bruin (eds.) (1996) *Eriophyoid Mites: Their Biology, Natural Enemies and Control*. Elsevier, Amsterdam. 822 pp.
- Lucas, É., D. Coderre and J. Brodeur (1998) Intraguild predation among aphid predators: characterization and influence of extraguild prey density. *Ecology* 79: 1084–1092.
- Lucas, É., B. Fréchet and O. Alomar (2009) Resource quality, resource availability, and intraguild predation among omnivorous mirids. *Biocontrol Sci. Technol.* 19: 555–572.
- Maeda, T. and J. Takabayashi (2001) Production of herbivore-induced plant volatiles and their attractiveness to *Phytoseius persimilis* (Acari: Phytoseiidae) with changes of *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) density on a plant. *Appl. Entomol. Zool.* 36: 47–52.
- Maeda, T., J. Takabayashi, S. Yano and A. Takafuji (1999) Response of the predatory mite, *Amblyseius womersleyi* (Acari: Phytoseiidae), toward herbivore-induced plant volatiles: variation in response between two local populations. *Appl. Entomol. Zool.* 34: 449–454.
- Maoz, Y., S. Gal, Y. Argov, S. Domeradzky, E. Melamed, S. Gan-Mor, M. Coll and E. Palevsky (2014) Efficacy of indigenous predatory mites (Acari: Phytoseiidae) against the citrus rust mite *Phyllocoptruta oleivora* (Acari: Eriophyidae): augmentation and conservation biological control in Israeli citrus orchards. *Exp. Appl. Acarol.* 63: 295–312.
- Marcossi, Í., M. M. Fonseca, P. A. Carbajal, A. Cardoso, A. Pallini and A. Janssen (2020) High-quality alternative food reduces cannibalism in the predatory mite *Amblyseius herbicolus* (Acari: Phytoseiidae). *Exp. Appl. Acarol.* 81: 189–200.
- 増井伸一 (2010) キアシクロヒメテントウ *Stethorus japonicus* 幼虫に対する各種殺虫剤の影響. 関東病虫研報 57: 129–130. [Masui, S. (2010) Effects of insecticides on the larvae of the Acarophagous ladybird beetle *Stethorus japonicus* H. Kamiya (Coleoptera: Coccinellidae). *Ann. Rept. Kanto Pl. Prot. Soc.* 57: 129–130.]
- 増井伸一 (2011) チャノキイロアザミウマ成虫のカンキツ園への飛来時期予測法に関する研究. 静岡農林研特報 4: 1–63. [Masui, S. (2011) Forecasting the time of immigration of adults of the yellow tea thrips, *Scirtothrips dorsalis* Hood (Thysanoptera: Thripidae), into citrus orchards. *Tech. Bull. Shizuoka Res. Inst. Agric. For.* 4: 1–63.]
- 増井伸一・片山晴喜 (2016) カンキツ園におけるミカンハダニの土着天敵を活用した殺ダニ剤削減の経過. 植物防疫 70: 767–772. [Masui, S. and H. Katayama (2016) The process in reduction of acaricide application to control *Panonychus citri* by conservation biological control in citrus orchards. *Plant Prot.* 70: 767–772.]
- 増井伸一・片山晴喜 (2017) カンキツ園の下草と周辺樹

- 木におけるカブリダニ類 (Acari: Phytoseiidae) の発生実態. 静岡農林研報 10: 27–36. [Masui, S. and H. Katayama (2017) Occurrence of phytoseiid mite (Acari: Phytoseiidae) on underbrush and trees in the area surrounding citrus orchards. *Bull. Shizuoka Res. Inst. Agric. For.* 10: 27–36.]
- 増井伸一・片山晴喜 (2019) ニセラーゴカブリダニとコウズケカブリダニ (ダニ目: カブリダニ科) の餌としての樹木花粉の有効性. 応動昆 63: 207–214. [Masui, S. and H. Katayama (2019) Effectiveness of different types of tree pollen as food for *Amblyseius eharai* and *Euseius sojaensis* (Acari: Phytoseiidae). *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 63: 207–214.]
- 増井伸一・片山晴喜 (2021) ウンシュウミカン園に発生するカブリダニ類 (ダニ目: カブリダニ科) によるミカンハダニ (ダニ目: ハダニ科) 密度抑制機能に及ぼす殺菌剤散布の影響. 応動昆 65: 143–147. [Masui, S. and H. Katayama (2021) Effects of fungicide application on the density suppression of *panonychus citri* (Acari: Tetranychidae) by phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae) in Satsuma mandarin fields. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 65: 143–147.]
- 増井伸一・片山晴喜・金子修治 (2018) 露地栽培カンキツの IPM における天敵利用の現状と課題. 応動昆 62: 137–148. [Masui, S., H. Katayama and S. Kaneko (2018) Status and use of biological control of insect pests in citrus IPM. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 62: 137–148.]
- McCoy, C. W. (1996) Styelar feeding injury and control of eriophyoid mites in citrus. In: Lindquist, E. E., M. W. Sabelis and J. Bruin (eds.) *Eriophyoid Mites: Their Biology, Natural Enemies and Control*. Elsevier, Amsterdam. pp 513–526.
- McMurtry, J. A. (1982) The use of phytoseiids for biological control: progress and future prospects. In: Hoy, M. A. (ed.) *Recent Advances in Knowledge of the Phytoseiidae*. Division of Agricultural Science, Univ. of California, Berkeley. pp 23–48.
- McMurtry, J. A. (1992) Dynamics and potential impact of ‘generalist’ phytoseiids in agroecosystems and possibilities for establishment of exotic species. *Exp. Appl. Acarol.* 14: 371–382.
- McMurtry, J. A. and B. A. Croft (1997) Life-styles of phytoseiid mites and their roles in biological control. *Ann. Rev. Entomol.* 42: 291–321.
- McMurtry, J. A., G. J. De Moraes and N. F. Sourassou (2013) Revision of the lifestyles of phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae) and implications for biological control strategies. *Syst. Appl. Acarol.* 18: 297–320.
- Messelink, G. J. (2014) Persistent and emerging pests in greenhouse crops: is there a need for new natural enemies? *IOBC/WPRS Bull.* 102: 143–150.
- Messelink, G. J., R. van Maanen, S. E. F. van Steenpaal and A. Janssen (2008) Biological control of thrips and whiteflies by a shared predator: Two pests are better than one. *Biol. Control* 44: 372–379.
- Messelink, G. J., R. Van Maanen, R. Van Holstein-Saj, M. W. Sabelis and A. Janssen (2010) Pest species diversity enhances control of spider mites and whiteflies by a generalist phytoseiid predator. *BioControl* 55: 387–398.
- Messelink, G. J., M. W. Sabelis and A. Janssen (2012) Generalist predators, food web complexities and biological pest control in greenhouse crops. In: Larramendy, M. L. and S. Soloneski (eds.) *Integrated Pest Management and Pest Control: Current and Future Tactics*. InTech, Rijeka. pp 191–214.
- Messelink, G. J., J. Bennison, O. Alomar, B. L. Ingegno, L. Tavella, L. Shipp, E. Palevsky and F. Wäckers (2014) Approaches to conserving natural enemy populations in greenhouse crops: current methods and future prospects. *BioControl* 59: 377–393.
- 宮井俊一 (2005) 巻頭言. 植物防疫 59: 451–452.
- 三好孝典・川幡 寛・清水伸一 (2007) 濡れたカンキツ樹へのマンゼブ水和剤散布がマンゼブ付着量およびカンキツ黒点病の防除効果に及ぼす影響. 日植病報 73: 149–154. [Miyoshi, T., Y. Kawahata and S. Shimizu (2007) The effect of mancozeb wp (wetable powder) on mancozeb adhesion and melanose control after application on wet citrus trees. *Jpn. J. Phytopathol.* 73: 149–154.]

- 望月雅俊 (2014) ブドウ園でのカブリダニ類保護の点からみた緑肥用ダイズでのカブリダニ類と食植性アザミウマ類の発生状況. 日本ダニ学会誌 23: 79–89. [Mochizuki, M. (2014) Seasonal occurrence and species composition of phytoseiid mites and phytophagous thrips on forage soybean with a view to conservation of phytoseiid mites in vineyards. *J. Acarol. Soc. Jpn.* 23: 79–89.]
- 森 樊須・齋藤 裕・古橋嘉一・中尾弘志・芦原 亘 (1993) 天敵農薬—チリカブリダニその生態と応用— (森 樊須編). 日本植物防疫協会, 東京. 130 pp.
- 森 介計 (1964) ミカンハダニの発生と天敵類の活動およびこれらと薬剤散布との関係. 愛媛果試研報 4: 43–55. [Mori, S. (1964) Effects of the activities of natural enemies, and of the pesticide sprayings on the population density of citrus red mite, *Panonychus citri* McGregor in citrus orchards. *Bull. Ehime Fruit Tree Exp. Sta.* 4: 43–55.]
- 長坂幸吉・杜建明・日本 典秀, 守屋 成一・後藤 千枝・櫻井 民人・山内 智史・澤田 守 (2020) 施設ミニトマト有機 JAS 認証圃場における主要害虫の10年間の年次変動に基づいた管理対策. 農研機構研究報告 5: 31–48. [Nagasaka, K., DU, Jianming, N. Hinomoto, S. Moriya, C. Goto, T. Sakurai, N. Yamauchi and M. Sawada (2020) A pest management program based on a 10-year survey of major insect pests of greenhouse cherry tomato in organic farming. *J. NARO Res. Dev.* 5: 31–48.]
- 中垣至郎 (1968) ナシのハダニ類の薬剤抵抗性と種類別感受性差異について. 千葉農試研報 8: 27–41. [Nakagaki, S. (1968) Acaricide resistance of some red spider mites in pear orchards with special reference to the species difference in susceptibility. *Bull. Chiba Agric. Exp. Stn.* 8: 27–41.]
- 中井善太・大谷 徹・福田 寛 (2018) ニセナシサビダニに起因するニホンナシのモザイク症状に対する各種薬剤の被害抑制効果. 関東病虫研報 65: 136–138. [Nakai, Z., Ohtani, T. and H. Fukuda (2018) Suppressive effect of pesticides on the leaf mosaic symptom of Japanese pear rust caused by *Eriophyes chibaensis* Kadono. *Ann. Rept. Kanto Pl. Prot. Soc.* 65: 136–138.]
- 中村知史 (1998) 昆虫成長制御材開発の最近の動向. 植物防疫 52: 293–297. [Nakamura, S. (1998) Insect growth regulators: recent trends of development. *Plant Prot.* 52: 293–297.]
- 中筋房夫 (1997) 総合的害虫管理学. 養賢堂, 東京. 273pp.
- 檜原 稔 (編) (2006) 病害虫防除技術の最前線 連絡試験成果集—平成10年から16年を中心に—第7集 ミカンサビダニの防除対策. 九州病害虫防除推進協議会, 福岡. 21 pp.
- Negloh, K., R. Hanna and P. Schausberger (2012) Intraguild predation and cannibalism between the predatory mites *Neoseiulus neobaraki* and *N. paspalivorus*, natural enemies of the coconut mite *Aceria guerreronis*. *Exp. Appl. Acarol.* 58: 235–246.
- 日本応用動物昆虫学会 (編) (2006) 農林有害動物・昆虫名鑑増補改訂版. 日本植物防疫協会, 東京. 387 pp. [Jpn. Soc. Appl. Entomol. Zool. (ed.) (2006) *Major Insect and Other Pests of Economic Plants in Japan*. Jpn. Plant Prot. Assoc., Tokyo. 387 pp.]
- 西野 操・高木一夫 (1981) 中国から導入したヤノネカイガラムシの寄生蜂. 植物防疫 35: 253–256. [Nishino, M. and K. Takagi (1981) Parasites of arrowhead scale, *Unaspis yanonensis* Kuwana introduced from People's Republic of China. *Plant Prot.* 35: 253–256.]
- 農研機構 (2021) 新果樹のハダニ防除マニュアル. https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/files/20210330nifts_hadani_tec_manual.pdf (accessed December, 2021)
- 農山漁村文化協会 (編) (2016) 天敵活用大辞典. 農山漁村文化協会, 東京. 824pp. [Rural Culture Association Japan (ed.) (2016) *Encyclopedia of Natural Enemies and Their Use for Biological Control in IPM*. Rural Culture Association Japan, Tokyo. 824 pp.]
- Oaten, A. and W. W. Murdoch (1975a) Functional response and stability in predator–prey systems. *Am. Nat.* 109: 289–298.
- Oaten, A. and W. W. Murdoch (1975b) Switching functional response and stability in predator–prey systems. *Am. Nat.* 109: 299–318.
- 大政義久 (1990) カンキツに寄生するコナカイガラムシ

- 類の防除対策. 植物防疫 44: 256–259. [Ohmasa, Y. (1990) Ecology and control of the mealybug on citrus trees. *Plant Prot.* 44: 256–259.]
- 大西論平・金崎秀司・崎本孝江・荻原洋晶・大政義久・池内 温 (2003) ミカンハダニに対する天敵利用技術の研究 (第 1 報) 宮内イヨカン園における農薬散布がミカンハダニ及び天敵の発生に及ぼす影響. 愛媛果樹試研報 17: 43–52. [Ohnishi, R., S. Kanazaki, T. Sakimoto, H. Ogihara, Y. Ohmasa and S. Ikeuchi (2003) Studies on the usage of natural enemies in the control of citrus red mite (*Panonychus citri* (McGregor)) (No. 1): The effects of pesticide application on populations of citrus red mite and its natural enemies in citrus orchards. *Ehime Fruit Tree Exp. Sta.* 17: 43–52.]
- 大西論平・金崎秀司・大政義久 (2008) ミカンサビダニの越冬生態と発生消長. 愛媛果樹試研報 22: 25–35. [Ohnishi, R., S. Kanazaki and Y. Ohmasa (2008) Relation between the wintering population density and succeeding seasonal prevalence of occurrence of pink citrus rust mite, *Aculops pelekassi* (Keifer) on Satsuma mandarin. *Bull. Ehime Fruit Tree Exp. Sta.* 22: 25–35.]
- Osakabe, M. (1988) Relationships between food substances and developmental success in *Amblyseius sojaensis* Ehara (Acari: Phytoseiidae). *Appl. Entomol. Zool.* 23: 45–51.
- 刑部正博・上杉龍士 (2009) ハダニの薬剤抵抗性. 日本農薬学会誌 34: 207–214. [Osakabe, M. and R. Uesugi (2009) Acaricide resistance in spider mites. *J. Pestic. Sci.* 34: 207–214.]
- Osakabe, M., K. Inoue and W. Ashihara (1987) Effect of *Amblyseius sojaensis* Ehara (Acarina: Phytoseiidae) as a predator of *Panonychus citri* (McGregor) and *Tetranychus kanzawai* Kishida (Acarina: Tetranychidae). *Appl. Entomol. Zool.* 22: 594–599.
- 刑部正博・森本健次・本郷公子・舟山 健・大隅専一 (2007) 吐糸を介したハダニの種間関係. 植物防疫 61: 268–272. [Osakabe, M., K. Morimoto, K. Hongo, K. Funayama and S. Osumi (2007) Amensalism via webs in spider mites. *Plant Prot.* 61: 268–272.]
- Ozawa, A., T. Uchiyama and S. Toyoshima (2010) Studies of the predatory mite fauna (Acari: Phytoseiidae) on tea trees in Shizuoka prefecture, Japan. <https://www.ocha-festival.jp/archive/english/conference/ICOS2010/files/PROC/pr-p-50.pdf> (accessed December, 2021)
- 小澤朗人・内山 徹 (2019) 静岡県のチャ園に自然発生したチリカブリダニ *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot の周年動態. 関東病虫研報 66: 100–105. [Ozawa, A. and T. Uchiyama (2019) Seasonal population dynamics of the exotic predatory mite, *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot (Acari: Phytoseiidae) estimated to have colonized tea fields in Shizuoka Prefecture, Japan. *Ann. Rept. Kanto Pl. Prot. Soc.* 66: 100–105.]
- Ozawa, M. and S. Yano (2009) Pearl bodies of *Cayratia japonica* (Thunb.) Gagnep. (Vitaceae) as alternative food for a predatory mite *Euseius sojaensis* (Ehara) (Acari: Phytoseiidae). *Ecol. Res.* 24: 257–262.
- Palevsky, E., S. Gal, Y. Maoz, Y. Abrahams, E. Melamed, S. Domeratzky, S. Gross, S. Shmueli, S. Gan-Mor, B. Ronen and Y. Argov (2010) Windborne pollen provisioning cover crops (WPPCC) for enhancing the population levels of *Euseius scutalis* and improving citrus rust mite control. *Bull. SROP/WPRS* 62: 93–97.
- Park, H. H., L. Shipp and R. Buitenhuis (2010) Predation, development, and oviposition by the predatory mite *Amblyseius swirkii* (Acari: Phytoseiidae) on tomato russet mite (Acari: Eriophyidae). *J. Econ. Entomol.* 103: 563–569.
- Paula, D. P., D. A. Andow, B. I. P. Barratt, R. S. Pfannenstiel, P. J. Gerard, J. H. Todd, T. Zazievo, M. G. Luna, C. V. Cédola, A. J. M. Loomans, A. G. Howe, M. D. Day, C. Ehlers, C. Green, S. Arpaia, E. Yano, G. L. Lövei, N. Hinomoto, E. M. G. Fontes, C. S. S. Pires, P. H. B. Togni, J. R. Nechols, M. D. Eubanks and J. C. van Lenteren (2021) Integrating adverse effect analysis into environmental risk assessment for exotic generalist arthropod biological control agents: a three-tiered framework. *BioControl* 66: 113–139.

- Pijnakker, J., A. de Souza A. and F. Wäckers (2014) *Euseius gallicus*, a bodyguard for roses. IOBC/WPRS Bull. 102: 191–195.
- Pijnakker J., Y. Arijs, A. de Souza, M. Cellier and F. Wäckers (2016) The use of *Typha angustifolia* (cattail) pollen to establish the predatory mites *Amblyseius swirskii*, *Iphiseius degenerans*, *Euseius ovalis* and *Euseius gallicus* in glasshouse crops. IOBC-WPRS Bull. 120: 47–54.
- Polis, G. A. (1981) The evolution and dynamics of intraspecific predation. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 12: 225–251.
- Polis, G. A., C. A. Myers and R. D. Holt (1989) The ecology and evolution of intraguild predation: potential competitors that eat each other. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 20: 297–330.
- Polis, G. A., A. L. W. Sears, G. R. Huxel, D. R. Strong and J. Maron (2000) When is a trophic cascade a trophic cascade? *Trends Ecol. Evol.* 15: 473–475.
- 渠 慎春・田代暢哉・衛藤友紀・貞松光男 (1997) 佐賀県におけるジチオカーバメート系薬剤抵抗性ミカンサビダニの発生と有効薬剤の探索. 九病虫研会報 43: 125–129. [Qu, S. C., N. Tashiro, T. Etoh and M. Sadamatsu (1997) Occurrence of dithiocarbamate resistant strain and its susceptibilities to several chemicals in the pink citrus rust mite, *Aculops pelekassi* (Keifer), in Saga Prefecture. *Proc. Assoc. Pl. Prot. Kyushu* 43: 125–129.]
- Riechert, S. E. and T. Lockley (1984) Spiders as biological control agents. *Ann. Rev. Entomol.* 29: 299–320.
- Ripper, W. E. (1956) Effect of pesticides on balance of arthropod populations. *Annu. Rev. Entomol.* 1: 403–438.
- Rosenheim, J. A. (1998) Higher-order predators and the regulation of insect herbivore populations. *Ann. Rev. Entomol.* 43: 421–447.
- Rosenheim, J. A. (2001) Source-sink dynamics for a generalist insect predator in habitats with strong higher-order predation. *Ecol. Monog.* 71: 93–116.
- Rosenheim, J. A., L. R. Wilhoit and C. A. Armer (1993) Influence of intraguild predation among generalist insect predators on the suppression of an herbivore population. *Oecologia* 96: 439–449.
- Rosenheim, J. A., H. K. Kaya, L. E. Ehler, J. J. Marois and B. A. Jaffee (1995) Intraguild predation among biological-control agents: theory and evidence. *Biol. Control* 5: 303–335.
- Ruberson, J., H. Nemoto and Y. Hirose (1998) Pesticides and conservation of natural enemies in pest management. In: Barbosa, P. (ed.) *Conservation Biological Control*. Academic press, San Diego. pp 207–220.
- Sabelis, M. W. (1996) Phytoseiidae. In: Lindquist, E. E., M. W. Sabelis and J. Bruin (eds.) *Eriophyoid Mites: Their Biology, Natural Enemies and Control*. Elsevier, Amsterdam. pp 427–456.
- Sabelis, M. W. and H. E. Van de Baan (1983) Location of distant spider mite colonies by phytoseiid predators: demonstration of specific kairomones emitted by *Tetranychus urticae* and *Panonychus ulmi*. *Entomol. Exp. Appl.* 33: 303–314.
- 貞松光男・御厨秀樹・緒方和裕 (1986) ナシ黒斑病に対するポリオキシン剤の散布方法と耐性菌の出現. 佐賀果試研報 9: 93–102. [Sadamatsu, M. H. Mikuriya and K. Ogata (1986) Application methods for polyoxin to black spot (*Alternaria kikuchiana* Tanaka) on pear and emergence of resistant strains. *Bull. Saga Fruit Tree Exp. Stn.* 9: 93–102.]
- Saito, Y. (1985) Life types of spider mites. In: Helle, W. and M. W. Sabelis (eds.) *Spider Mites: Their Biology, Natural Enemies and Control*. Elsevier, Amsterdam. pp 253–264.
- Saito, Y. and M. Osakabe (1992) A new fixation method for preparing mite specimens for optical and SEM microscopic observations. *Appl. Entomol. Zool.* 27: 427–436.
- 阪本大輔・羽山裕子・伊東明子・榎村芳記・森口卓哉・中村ゆり (2008) モモ溶液受粉のための液体増量剤への PME または PG の添加が結実に及ぼす影響. 園学研 7: 525–530. [Sakamoto, D., H. Hayama, A. Ito, Y. Kashimura, T. Moriguchi and Y. Nakamura (2008) Effect of PME or PG on fruit set in suspension media for spray pollination in

- peach. *Hort. Res. (Japan)* 7: 525–530.]
- Samaras, K., M. L. Pappas, A. Pekas, F. Wäckers and G. D. Broufas (2021) Benefits of balanced diet? Mixing prey with pollen is advantageous for the phytoseiid predator *Amblyseius limonicus*. *Biol. Control* 155: 104531.
- SAS Institute (2015) *JMP: Statistic and Graphics Guide, version 12*. SAS Institute, Cary, NC.
- Schausberger, P. (2003) Cannibalism among phytoseiid mites: a review. *Exp. Appl. Acarol.* 29: 173–191.
- Schausberger, P. and B. A. Croft (2000a) Cannibalism and intraguild predation among phytoseiid mites: are aggressiveness and prey preference related to diet specialization? *Exp. Appl. Acarol.* 24: 709–725.
- Schausberger, P. and B. A. Croft (2000b) Nutritional benefits of intraguild predation and cannibalism among generalist and specialist phytoseiid mites. *Ecol. Entomol.* 25: 473–480.
- Schausberger, P. and A. Walzer (2001) Combined versus single species release of predaceous mites: Predator–predator interactions and pest suppression. *Biol. Control* 20: 269–278.
- Schmitz, O. J. and K. B. Suttle (2001) Effects of top predator species on direct and indirect interactions in a food web. *Ecology* 82: 2072–2081.
- Seelmann, L., A. Auer, D. Hoffmann and P. Schausberger (2007) Leaf pubescence mediates intraguild predation between predatory mites. *Oikos* 116: 807–817.
- 関 道生 (1979) ミカンサビダニ *Aculops pelekassi* (Keifer) の生態学的研究. 佐賀果試特報 2: 1–66. [Seki, M. (1979) Ecological studies of the pink citrus rust mite, *Aculops pelekassi* (Keifer), which special reference to the life cycle, forecasting of occurrence and chemical control of *A. pelekassi*. *Spec. Bull. Saga Pref. Fruit Tree Exp. Sta.* 2: 1–66.]
- Shibao, M., S. Ehara, A. Hosomi and H. Tanaka (2004) Seasonal fluctuation in population density of phytoseiid mites and the yellow tea thrips, *Scirtothrips dorsalis* Hood (Thysanoptera: Thripidae) on grape, and predation of the thrips by *Euseius sojaensis* (Ehara) (Acari: Phytoseiidae). *Appl. Entomol. Zool.* 39: 727–730.
- 柴尾 学・江原昭三・細見彰洋・田中 寛 (2006) ブドウにおけるチャノキイロアザミウマとコウズケカブリダニの個体群密度に及ぼす薬剤散布の影響. 応動昆 50: 247–252. [Shibao, M., S. Ehara, A. Hosomi and H. Tanaka (2006) Effect of insecticide application on the population density of yellow tea thrips, *Scirtothrips dorsalis* Hood (Thysanoptera: Thripidae) and *Euseius sojaensis* (Ehara) (Acari: Phytoseiidae) on grapes. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 50: 247–252.]
- 清水 健・中井善太・福田 寛 (2019) ニホンナシのニセナシサビダニおよびモザイク症状に対する各種殺虫剤の効果. 関東病虫研報 66: 113–114. [Shimizu, K., Z. Nakai and H. Fukuda (2019) Effect of insecticides on *Eriophyes chibaensis* Kadono (Acari: Eriophyidae) and the leaf mosaic symptom on Japanese pear in Chiba Prefecture, Japan. *Ann. Rept. Kanto Pl. Prot. Soc.* 66: 113–114.]
- 下田武志・芦原 亘 (1996) カンキツ園内外におけるハダニ類とケシハネカクシ類の発生動態. 九病虫研会報 42: 133–137. [Shimoda, T. and W. Ashihara (1996) Seasonal population trends of spider mites and their insect predator, *Oligota kashmirica benefica* Naomi (Coleoptera: Staphylinidae), in Satsuma mandarin groves and in Japanese cedar windbreaks around the orchards. *Proc. Assoc. Pl. Prot. Kyushu* 42: 133–137.]
- Shimoda, T., R. Ozawa, K. Sano, E. Yano and J. Takabayashi (2005) The involvement of volatile infochemicals from spider mites and from food-plants in prey location of the generalist predatory mite *Neoseiulus californicus*. *J. Chem. Ecol.* 31: 2019–2032.
- 静岡県経済農業協同組合連合会 (2021) 柑橘病害虫防除暦と指導要領. 静岡県経済農業協同組合連合会. 静岡. 90pp.
- Smith, D. and D. F. Papacek (1991) Studies of the predatory mite *Amblyseius victoriensis* (Acarina: Phytoseiidae) in citrus orchards in south-east Queensland: control of *Tegolophus australis* and

- Phyllocoptruta oleivora* (Acarina: Eriophyidae), effect of pesticides, alternative host plants and augmentative release. *Exp. Appl. Acarol.* 12: 195–217.
- Snyder, W. E. and A. R. Ives (2001) Generalist predators disrupt biological control by a specialist parasitoid. *Ecology* 82: 705–716.
- Snyder, W. E. and D. H. Wise (2001) Contrasting trophic cascades generated by a community of generalist predators. *Ecology* 82: 1571–1583.
- Snyder, W. E., S. B. Joseph, R. F. Preziosi and A. J. Moore (2000) Nutritional benefits of cannibalism for the lady beetle *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) when prey quality is poor. *Environ. Entomol.* 29: 1173–1179.
- Solomon, M. E. (1949) The natural control of animal populations. *J. Anim. Ecol.* 18: 1–35.
- 園田昌司・山下 純・岸本英成 (2017) モモ圃場におけるカブリダニの植物餌資源の利用. 植物防疫 71: 92–98. [Sonoda, S., J. Yamashita and H. Kishimoto (2017) Utilization of plant resources by phytoseiid mite species in peach orchards. *Plant Prot.* 71: 92–98.]
- Strong, D. R. (1992) Are trophic cascades all wet? Differentiation and donor-control in speciose ecosystems. *Ecology* 73: 747–754.
- 杉浦直幸 (2013) ナシのモザイク症 (仮称) の被害状況について. 農林害虫防除研究会 Newsletter 31: 23–25.
- 鈴木敏男 (2010) リンゴを加害するハダニ類の発生動向と殺ダニ剤の変遷. 岩手農研セ研報 10: 113–126.
- Symondson, W. O. C., K. D. Sunderland and M. H. Greenstone (2002) Can generalist predators be effective biocontrol agents? *Ann. Rev. Entomol.* 47: 561–594.
- Takahashi, F. and D. A. Chant (1993) Phylogenetic relationships in the genus *Phytoseiulus* Evans (Acari: Phytoseiidae). I. Geographic distribution. *Int. J. Acarol.* 19: 15–22.
- 高橋英夫・高藤晃雄・高林純示 (2001) 粘着トラップによるハダニ天敵昆虫類調査法—ハダニ低密度圃場における有用性評価と合成植物揮発成分が捕獲数に与える影響—. 応動昆 45: 189–194. [Takahashi, H., A. Takafuji and J. Takabayashi (2001) Efficiency of a sticky trap for censusing the natural enemy fauna of spider mites. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 45: 189–194.]
- Tanaka, M. and T. Kashio (1977) Biological studies on *Amblyseius largoensis* Muma (Acarina: Phytoseiidae) as a predator of the citrus red mite, *Panonychus citri* (McGregor) (Acarina: Tetranychidae). *Bull. Fruit Tree Res. Stn. D* 1: 49–67.
- Tanigoshi, L. K., J. Fargerlund, J. Y. Nishio-Wong and H. J. Griffiths (1985) Biological control of citrus thrips, *Scirtothrips citri* (Thysanoptera: Thripidae), in southern California citrus groves. *Environ. Entomol.* 14: 733–741.
- 多々良明夫 (1992) 反射フィルムによるカンキツ園のチャノキイロアザミウマ防除効果. 静岡柑試研報 24: 39–52. [Tatara, A. (1992) Reflective sheet as control measures for tea yellow thrips (*Scirtothrips dorsalis* Hood) in citrus grove. *Bull. Shizuoka. Citrus Exp. Sta.* 24: 39–52.]
- Taylor, J. M. and W. E. Snyder (2020) Are specialists really safer than generalists for classical biocontrol? *BioControl* 66: 9–22.
- Tomson, L. J., S. Macfadyen and A. A. Hoffmann (2010) Predicting the effects of climate change on natural enemies of agricultural pests. *Biol. Control* 52: 296–306.
- Toyoshima, S., F. Ihara and H. Amano (2008) Diversity and abundance of phytoseiid mites in natural vegetation in the vicinity of apple orchards in Japan. *Appl. Entomol. Zool.* 43: 443–450.
- Toyoshima, S., K. Yaginuma, F. Ihara, T. Arai and M. Takanashi (2011) The succession of phytophagous and phytoseiid species in a newly planted apple orchard without insecticide application. *J. Acarol. Soc. Jpn.* 20: 77–86.
- Toyoshima, S., H. Kishimoto and H. Amano (2013) Phytoseiid mite portal. <http://phytoseiidae.acarology-japan.org/> (accessed December, 2021)
- 土田祐大・増井伸一 (2018) 静岡県におけるミカンサビダニに対する各種薬剤の殺虫効果. 関西病虫研報

- 60: 3–7. [Tsuchida, Y. and S. Masui (2018) Pesticide toxicity toward pink citrus rust mite, *Aculops pelekassi* (Keifer), in Shizuoka Prefecture. *Ann. Rept. Kansai Pl. Prot.* 60: 3–7.]
- 土田祐大・増井伸一 (2019) 静岡県のカンキツ園に生息する 2 種土着広食性カブリダニに対する各種薬剤の影響. 関西病虫研報 61: 99–104. [Tsuchida, Y. and S. Masui (2019) Effect of pesticides on two native generalist phytoseiid species inhabiting citrus orchards in Shizuoka Prefecture. *Ann. Rept. Kansai Pl. Prot.* 61: 99–104.]
- Tsuchida, Y. and S. Masui (2020) Effects of providing pollen to *Euseius sojaensis* or *Amblyseius eharai* (Acari: Phytoseiidae) on populations of the pink citrus rust mite, *Aculops pelekassi* (Acari: Eriophyidae). *Appl. Entomol. Zool.* 55: 241–248.
- 土田祐大・増井伸一 (2020) 経済栽培カンキツ園におけるコウズケカブリダニ (ダニ目: カブリダニ科) によるミカンサビダニ (ダニ目: フシダニ科) の生物的防除. 応動昆 64: 165–174. [Tsuchida, Y. and S. Masui (2020) Biological control of pink citrus rust mite, *Aculops pelekassi* (Acari: Eriophyidae), by *Euseius sojaensis* (Acari: Phytoseiidae) in commercial citrus orchards. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 64: 165–174.]
- 土田祐大・増井伸一 (2021) ニホンナシにおけるコウズケカブリダニまたはニセラーゴカブリダニ (ダニ目: カブリダニ科) によるカンザワハダニ (ダニ目: ハダニ科) の発生抑制効果. 応動昆 65: 99–108. [Tsuchida, Y. and S. Masui (2021) Suppressive effect of *Euseius sojaensis* or *Amblyseius eharai* (Acari: Phytoseiidae) on *Tetranychus kanzawai* (Acari: Tetranychidae) on Japanese pear. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 65: 99–108.]
- Tsuchida, Y. and S. Masui (2021) Biological control of the Japanese pear rust mite, *Eriophyes chibaensis* (Acari: Eriophyidae) and the Kanzawa spider mite, *Tetranychus kanzawai* (Acari: Tetranychidae) with *Euseius sojaensis* (Acari: Phytoseiidae). *Exp. Appl. Acarol.* 84: 673–686.
- Tsuchida, Y., S. Masui and A. Kasai (2022) Effects of intraguild predation and cannibalism in two generalist phytoseiid species on prey density of the pink citrus rust mite in the presence of high-quality food. *BioControl*. 67: 287–296.
- 土屋雅利 (2005a) ウンシュウミカン園における土着天敵による夏季のミカンハダニの防除効果. 静岡柑試研報 34: 15–27. [Tsuchiya, M. (2005a) The control effect on citrus red mite (*Panonychus citri*) on Satsuma mandarin groves in summer by indigenous natural enemies. *Bull. Shizuoka Citrus Exp. Stn.* 34: 15–27.]
- 土屋雅利 (2005b) カンキツの IPM. 植物防疫 50: 492–495. [Tsuchiya, M. (2005b) Recent advances of the integrated pest management on citrus. *Plant Prot.* 50: 492–495.]
- 内田正人 (1982) ナシ園におけるハダニ類の発生と被害に関する研究, 特に休眠性の生態的特性. 鳥取県果試特報 2: 1–63. [Uchida, M. (1982) Ecological studies on the abundance and diapause of spider mites and the damage caused by the spider mites in Japanese pear orchards. *Spec. Bull. Tottori Fruit Tree Exp. Stn.* 2: 1–63.]
- 梅本清作 (1993) ニホンナシ黒星病の発生生態と防除に関する研究. 千葉農試特報 22: 1–99. [Umemoto, S. (1993) Studies on the ecology and control of Japanese pear scab. *Spec. Bull. Chiba Pref. Agric. Exp. Stn.* 22: 1–99.]
- Van Houten, Y. M., H. Hoogerbrugge, K. Oude Lenferink, M. Knapp and K. J. F. Bolckmans (2016) Evaluation of *Euseius gallicus* as a biological control agent of western flower thrips and greenhouse whitefly in rose. *J. Acarol. Soc. Jpn.* 25: 147–159.
- van Lenteren, J. C. and J. Woets (1988) Biological and integrated pest control in greenhouses. *Annu. Rev. Entomol.* 33: 239–269.
- van Lenteren, J. C., K. Bolckmans, J. Köhl, W. J. Ravensberg and A. Urbaneja (2017) Biological control using invertebrates and microorganisms: plenty of new opportunities. *BioControl* 63: 39–59.
- Wade, M. R., M. P. Zalucki, S. D. Wratten and K. A. Robinson (2008) Conservation biological control of arthropods using artificial food sprays: Current status and future challenges. *Biol. Control* 45: 185–199.

- Walde, S. J., J. P. Nyrop and J. M. Hardman (1992) Dynamics of *Panonychus ulmi* and *Typhlodromus pyri*: factors contributing to persistence. *Exp. Appl. Acarol.* 14: 261–291.
- Walzer, A. and P. Schausberger (1999) Cannibalism and interspecific predation in the phytoseiid mites *Phytoseiulus persimilis* and *Neoseiulus californicus*: predation rates and effects on reproduction and juvenile development. *BioControl* 43: 457–468.
- Warburg, S., M. Inbar, S. Gal, M. Salomon, E. Palevsky and A. Sadeh (2018) The effects of a windborne pollen-provisioning cover crop on the phytoseiid community in citrus orchards in Israel. *Pest. Manag. Sci.* 75: 405–412.
- Warburg, S., R. Gafni, M. Inbar, S. Gal, E. Palevsky and A. Sadeh (2019) Climatic and cultivar effects on phytoseiid species establishment and seasonal abundance on citrus. *Acarologia* 59: 443–455.
- Wari, D., J. Yamashita, H. Kishimoto and S. Sonoda (2016) Utilization of plant food resources by phytoseiid mite species with different feeding habits. *Appl. Entomol. Zool.* 51: 539–547.
- Yamamura, K. (1999) Transformation using $(x + 0.5)$ to stabilize the variance of populations. *Res. Popul. Ecol.* 41: 229–234.
- 山崎大樹・糸山 亨 (2014) 地域ブランド「多摩川ナシ」におけるハダニ類の薬剤感受性. 関東病虫研報 61: 153–154. [Yamazaki, D. and K. Itoyama (2014) Acaricide susceptibility of spider mite in orchard with local brand of Japanese pear Tamagawanashi. *Ann. Rept. Kanto Pl. Prot. Soc.* 61: 153–154.]
- 山崎大樹・糸山 亨 (2015) 都市農業ナシ園におけるカブリダニ類の発生消長. 関東病虫研報 62: 153–155. [Yamazaki, D. and K. Itoyama (2015) Seasonal occurrence of phytoseiid mites in urbanized Japanese pear orchards. *Ann. Rept. Kanto Pl. Prot. Soc.* 62: 153–155.]

Summary

In the biological control of fruit tree pests in Japan, specialist natural enemies are used to control specific arthropod pest species. To control other pests, however, orchardists have to rely on synthetic agrochemicals, which can kill natural enemies and thus disrupt integrated pest management (IPM). In this study, I investigated the biocontrol efficacy of two indigenous generalist predatory phytoseiid mites, *Euseius sojaensis* (Ehara) and *Amblyseius eharai* Amitai et Swirski (Acari: Phytoseiidae), which can prey on various pest species. I evaluated the suppressive effect of each mite on pest populations in citrus and Japanese pear, and achieved effective IPM in commercial orchards with *E. sojaensis*. Since intra- and interspecific interactions of generalists could affect their efficacy, I evaluated the effects of intraguild predation (IGP) and cannibalism in *E. sojaensis* and *A. eharai* on the control of pest populations. On the basis of the results, I suggest a new IPM strategy incorporating biological control with *E. sojaensis* and how to maximize the efficacy of generalist phytoseiid mites.

1. Biological control of the pink citrus rust mite, *Aculops pelekassi* (Keifer) (Acari: Eriophyidae), with generalist phytoseiid mites in citrus orchards

(1) Predatory ability of generalist phytoseiid mites to the pink citrus rust mite

Relationships between prey consumption by *E. sojaensis* or *A. eharai* and the density of *A. pelekassi*, were investigated in the laboratory. The maximum daily consumption of prey was estimated as about 400 by *E. sojaensis* and about 500 by *A. eharai*.

(2) Effects of pollen provision to generalist phytoseiid mites on the biological control of the pink citrus rust mite

Suppressive effect of *E. sojaensis* or *A. eharai* on *A. pelekassi* populations with and without the supply of pollen as high-quality alternative food, was evaluated in the laboratory and the field. In the laboratory, the combination of *E. sojaensis* release and pollen provision increased *E. sojaensis* populations and reduced *A. pelekassi* densities. In the field, each of *E. sojaensis* release and pollen provision reduced *A. pelekassi* densities and the rate of fruit injury.

(3) Biological control of the pink citrus rust mite with *E. sojaensis* in commercial citrus orchards

Biocontrol efficacy of *E. sojaensis* against *A. pelekassi* was demonstrated in commercial citrus orchards with the conservation of the *E. sojaensis* population through the use of selective pesticides until late June, when its density peaked, and the inoculative release of *E. sojaensis*: phytoseiid mite densities were higher in the *E. sojaensis* release plot than in the no-release plot, and thus *A. pelekassi* and fruit injury were significantly better controlled.

2. Biological control of the Japanese pear rust mite, *Eriophyes chibaensis* Kadono (Acari: Eriophyidae) and the Kanzawa spider mite, *Tetranychus kanzawai* Kishida (Acari: Tetranychidae), with generalist phytoseiid mites in Japanese pear orchards

(1) Investigation of the phytoseiid species inhabiting Japanese pear orchards in Shizuoka Prefecture

Five phytoseiid species were found: *E. sojaensis*, *A. eharai*, *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot, *Neoseiulus californicus* (McGregor), and *Neoseiulus womersleyi* (Schicha) (Acari: Phytoseiidae). *Euseius sojaensis* occurred until early summer, but *A. eharai* occurred throughout the investigation period and was the dominant species. *Phytoseiulus persimilis*, *N. californicus*, and *N. womersleyi*, all specialist predators, were often found with the tetranychid mites.

(2) Biocontrol effect of generalist phytoseiid mites on tetranychid mites on Japanese pear tree

Biocontrol effect of *E. sojaensis* and *A. eharai* against *T. Kanzawai* was evaluated on Japanese pear trees growing in a greenhouse inhabited by both predatory mites. While *T. Kanzawai* densities were low, four treatments were applied: *E. sojaensis* release, *A. eharai* release, synthetic pyrethroid application, and an untreated control. Pollen as a high-quality alternative food for the predatory mites was provided in all treatments. In the *E. sojaensis* release plot and the control plot, *E. sojaensis* was the dominant phytoseiid species, and the densities of *T. Kanzawai* were lower than in the *A. eharai* release plot and the pyrethroid plot.

(3) Biological control of the Japanese pear rust mite and the Kanzawa spider mite with *E. sojaensis* in commercial Japanese pear orchards

Biocontrol efficacy of *E. sojaensis* against *E. chibaensis* and *T. Kanzawai* was demonstrated in Japanese pear orchards with the conservation of the *E. sojaensis* population through the use of selective pesticides until late June, when its density peaked, and the inoculative release of *E. sojaensis*: phytoseiid mite densities were higher in the *E. sojaensis* release plot than in the no-release plot, and thus *E. chibaensis*, *T. Kanzawai*, and leaf injury by *E. chibaensis* were controlled below their control threshold.

3. Effects of intraguild predation and cannibalism in two generalist phytoseiid species on biological control of the pink citrus rust mite in the presence of high-quality food

The intensity of IGP and cannibalism in *E. sojaensis* and *A. eharai* in the presence and absence of pollen were investigated. *Amblyseius eharai* was a stronger intraguild predator and cannibalistic predator than *E. sojaensis*, with or without pollen. In the presence of pollen, although IGP and cannibalism were relaxed in both species, they were not dramatically reduced in *A. eharai*. Next, the effects of IGP and cannibalism on the control of *A. pelekassi* by changing the release ratio of *E. sojaensis* and *A. eharai* was investigated in the presence of pollen. With release of *E. sojaensis* alone, the *E. sojaensis* population increased and thus *A. pelekassi* was controlled. With release of *A. eharai* alone, however, the *A. eharai* population did not increase and thus *A. pelekassi* was not controlled. Moreover, when *E. sojaensis* and *A. eharai* were released simultaneously, phytoseiid populations were smaller and *A. pelekassi* densities were greater at higher *A. eharai* release ratios.

My research reveals for the first time that of the two generalist indigenous phytoseiid species inhabiting orchards, *E. sojaensis* effectively controlled some eriophyid species. Its numbers increase from spring and its density peaks in early summer in various tree species. Therefore, conservation of *E. sojaensis* through the use of selective pesticides to control major pests would support the establishment of IPM incorporating biocontrol in a variety of orchards. Further, my results reveal that inoculative release of *E. sojaensis*, the provision of pollen as an alternative food, or both while pest densities are low boosts *E. sojaensis* densities before pest outbreaks occur and thus enhance biocontrol. Since pollen supply dramatically reduced cannibalism in *E. sojaensis*, this might have enhanced biocontrol efficiency. On the other hand, when *E. sojaensis* and *A. eharai* occur simultaneously, *A. eharai* disrupts the phytoseiid population increase owing to IGP and cannibalism, even in the presence of pollen, and thus could diminish biocontrol. Many generalist predators exist in agroecosystems, but this result indicates that enhancing their diversity does not always lead to successful biocontrol. My findings will find wide application in maximizing the efficacy of generalist natural enemies through biological control.

静岡県農林技術研究所 〒438-0803 静岡県磐田市富丘 678-1
電話(0538) 35-7211

茶業研究センター 〒439-0002 菊川市倉沢 1706-11
電話(0548) 27-2880

果樹研究センター 〒424-0101 静岡市清水区茂畑
電話(054) 376-6150

伊豆農業研究センター 〒413-0411 賀茂郡東伊豆町稲取 3012
電話(0557) 95-2341

森林・林業研究センター 〒434-0016 浜松市浜名区根堅 2542-8
電話(053) 583-3121

令和7年3月31日 発行

〒438-0803 静岡県磐田市富丘 678-1

編集兼
発行者

静岡県農林技術研究所

電話(0538) 35-7211