

博士論文

ヤマトトウキの葉の香気化合物ならびに
その有翅ワタアブラムシに対する誘引効果

(Aroma compounds of leaves in
Angelica acutiloba Kitagawa “Yamato-tōki” and
their attractive effects on the winged *Aphis gossypii* Glover)

西暦 2026 年 3 月

江副 史朗

山口大学大学院創成科学研究科

目次

第 1 章 緒論.....	1
第 2 章 ヤマトトウキ (<i>Angelica acutiloba</i> Kitagawa) の生葉とその乾燥パウダーの香気化合物	
2-1 序論.....	3
2-2 実験材料および手法.....	3
2-3 結果および考察.....	6
第 3 章 ヤマトトウキ (<i>Angelica acutiloba</i> Kitagawa) の香気化合物の有翅ワタアブラムシ (<i>Aphis gossypii</i> Glover) に対する誘引活性の解析	
3-2 序論.....	11
3-2 実験材料および手法.....	12
3-3 結果および考察.....	14
総括.....	20
摘要.....	21
謝辞.....	23
引用文献.....	24
原著論文.....	28

第1章 緒論

5～6 世紀頃、中国から日本に医学が伝わり、多くの漢方薬や生薬が導入されてきた。室町時代以降、医学は日本で独自に発展し、漢方薬は現代医療でも使用されている。トウキ (*Angelica acutiloba* Kitagawa) はセリ科の多年草植物で、草丈は約 0.4～1.0 m に成長し、茎は赤みがかった紫色を呈する。トウキの栽培は長い歴史を持ち、江戸時代初期に始まったと考えられている。現在、奈良県、北海道、富山県、そして群馬県は、日本におけるトウキの主要生産地である。特に、奈良県産の栽培株 (ヤマトトウキ) は、種が独自に維持されており、品質は良質とされている。トウキの栽培にあたっては、種子を播種し、春に苗を育て、翌春に移植し、そして薬用部位である根が2年目の秋に収穫される。

根は、刺激的な香りと苦味、ならびにわずかな甘みを有し、日本で多くの漢方薬の原料として使用されている (Fig. 1)。根の成分の効能は、婦人科疾患の改善、強壮作用などが含まれる。近年、漢方薬に使用される根に加え、深緑色でセロリのような香りを有する生薬やその乾燥パウダー (Fig. 2) が、お茶や調味料として使用されるようになった。そのトウキの葉ならびに根の香気成分に関して、台湾および韓国の報告が認められる¹⁻⁴⁾。台湾のグループは、トウキの葉の主要香気化合物として *n*-butylphthalide を同定し、一方で韓国のグループは ligustilide を報告した。しかしながら、日本産のトウキの葉の香気成分に関する報告はない。



Fig. 1 ヤマトトウキの根



Fig. 2 ヤマトトウキの生葉 (左) とその乾燥パウダー (右)

キアゲハ (*Papilio machaon* Linnaeus (Lepidoptera: Papilionidae))、シロイチモジヨトウ (*Spodoptera exigua* Hübner (Lepidoptera: Noctuidae))、そしてアブラムシは、セリ科植物の葉の既知の害虫である⁵⁻⁷⁾。これらの害虫はトウキにも深刻な被害をもたらし、摂食が葉の数を減少させるだけでなく、光合成を不十分にもし、漢方薬の原料として使用される根の成長不良を引き起こす。しかし、トウキの根は漢方薬に用いられるため、従来の農薬による一般的な防除は不可能である。その結果、防除方法は現在、手作業による駆除や認可された一部の農薬の散布に限られている。昆虫は、宿主植物を探索および認識するために、視覚的ならびに嗅覚的シグナルの両方を利用する⁸⁾。これまで、トウキが属するセリ科の植物由来の香気化合物が、害虫を誘引し、葉への産卵を誘導することが明らかになっている⁹⁻¹¹⁾。

本研究では、ヤマトウキの生葉およびその乾燥パウダーの香気化合物を調査し、異なる産地のものと比較した。次に、得られた精油中の香気化合物およびその主要成分に対する害虫の行動的応答を評価する野外試験を実施した。また、Y字管嗅覚測定装置を用いた生物試験を行った。

第2章 ヤマトトウキ (*Angelica acutiloba* Kitagawa) の生葉とその乾燥パウダーの香気化合物

2-1 序論

5～6 世紀頃、中国から日本に医学が伝わり、多くの漢方薬や生薬が導入されてきた。室町時代以降、医学は日本で独自に発展し、漢方薬は現代医療でも使用されている。*Angelica acutiloba* Kitagawa (日本ではトウキとして知られる) はセリ科の多年草植物で、草丈は約 0.4～1.0 m に成長し、茎は赤みがかった紫色を呈する。トウキの栽培は長い歴史を持ち、江戸時代初期に始まったと考えられている。現在、奈良県、北海道、富山県、そして群馬県は、日本におけるトウキの主要生産地である。栽培株は主に、進化系統種と、独立して維持、選抜されてきた在来品種から成る。特に、奈良県産の在来品種である栽培株 (ヤマトトウキ) は良質とされている。現在日本で使用されるトウキの約 70 % は中国から輸入されており、それは日本から供給された種子から栽培されたものである。トウキの栽培にあたっては、種子を播種し、春に苗を育て、翌春に移植し、そして薬用部位である根が 2 年目の秋に収穫される。

根は刺激적인香りと苦味ならびにわずかな甘みを有し、日本で多くの漢方薬の原料として使用される。根の成分の効能は、婦人科疾患の改善、強壮作用などが含まれる。トウキには異なる種があり、中国で栽培される *Angelica sinensis* Diels (中国で「dang gui」、日本で「唐トウキ」として知られる) と、韓国で栽培される *Angelica gigas* Nakai (日本では「韓トウキ」として知られる) がある。

近年、漢方薬に使用される根に加え、深緑色でセロリのような香りを有する生葉やその乾燥パウダーが、お茶や調味料として使用されるようになった。そのトウキの葉ならびに根の香気成分に関して、台湾および韓国の報告が認められる¹⁻⁴⁾。台湾のグループは、トウキの葉の主要化合物としてフタリド類の一種である *n*-butylphthalide を同定し、一方で韓国のグループは ligustilide を報告した。しかしながら、日本産のトウキの葉の香気成分に関する報告はない。したがって、本研究では、ヤマトトウキの生葉およびその乾燥パウダーの香気化合物を調査し、異なる産地のものと比較した。このような *Angelica* 種におけるフタリド類の組成の研究は、それらの植物を用いた治療効果と作用機序を実証するために貢献すると考える。

2-2 実験材料および手法

2-2.1 実験材料

すべての精製は、TLC (0.25 mm E. Merck silica gel plates (60 F254)) を用いて追跡し、関東化学工業 (株) より購入した silica gel 60 N (球状、中性、63-210 μm) をカラムクロマトグラフィーに用いた。

ヤマトトウキから単離した香気化合物は、InertCap TC-5 カラム (0.25 mm×60 m×0.25 µm、ジーエルサイエンス (株)) を装備し、FID を備えた、GC-17A ガスクロマトグラフ ((株) 島津製作所) を用いて追跡した。カラム温度は 100°C から 280°C (5 分間) まで 4°C/分の速度で上昇させた。注入温度と検出温度はそれぞれ 280°C および 290°C であった。キャリアガスは He (70 kPa) を使用した。

NMR スペクトルは、Bruker AVANCE 400 分光計を用いて、¹H は 400 MHz、¹³C は 100 MHz で測定した。化学シフトは、¹H については CDCl₃ 中の残留溶媒ピーク (δ 7.26) を、¹³C については CDCl₃ のピーク (δ 77.0) をそれぞれ内部基準として用いて決定した。

2-2.2 材料

ヤマトトウキの生葉は 2023 年 7 月に、乾燥パウダーは 2022 年 6 月に、農業組合法人うもれ木の郷 (山口県) よりそれぞれ提供を受け、分析するまで -20°C で保存した。全ての薬品と溶媒は特級を用いた。

2-2.3 ヤマトトウキの生葉および乾燥パウダーの精油の調製

生葉の精油を連続蒸留抽出 (simultaneous distillation extraction, SDE) 法により調製した。生葉 (70 g) を蒸留水 (200 mL) とともに摩砕し、直ちに pentane : CH₂Cl₂ = 2 : 1 (150 mL) を用いて SDE により 1.5 時間抽出した。3,3,5-trimethylcyclohexanone (0.32 mg) を内部標準物質として加えた。抽出物を Na₂SO₄ で乾燥し、濃縮後、精油 (88.07 ± 9.06 mg) を 0.13 ± 0.01 % (w/w) の収率で得た。

一方で、乾燥パウダー (10 g) は、蒸留水 (100 mL) と混合し、SDE 法に供した。生葉と同様の手順で、精油 (44.20 ± 1.64 mg) を 0.44 ± 0.02 % (w/w) の収率で得た。精油は分析まで N₂ 下で -20°C で保存した。

2-2.4 GC/MS を用いたヤマトトウキの生葉と乾燥パウダーの香気成分の分析

生葉と乾燥パウダーの精油は、DB-WAX カラム (0.25 µm i.d.× 60 m×0.25 µm, Agilent J&W, CA, USA) を装着した GC/MS (Shimadzu QP 2010 plus, (株) 島津製作所) を用いて分析した。温度プログラムは、50°C (4 分間) から 220°C (20 分間) まで 2°C/分で上昇させた。スプリット比は 10 : 1 であった。注入ポートは 220°C であった。He をキャリアガスとして 1.1 mL/分で用いた。イオン電圧は 70 eV で、イオン源温度は 220°C であった。香気化合物は、それらの保持指標 (RIs) ならびにマススペクトルを、標品または文献¹²⁻²⁷⁾と比較することで同定した。RIs は、*n*-alkane (C8-C28) を用いて決定した。各化合物は、内部標準物質のピーク面積より定量された。

2-2.5 ヤマトトウキの乾燥パウダーからのフタリド類の単離

乾燥パウダーの精油 (1.2 g) を hexane/ethyl acetate (15:1、3:1) を溶出溶媒として用いた

シリカゲルカラムクロマトグラフィーに供し、無色油状の化合物 I (245.5 mg, purity 93.4 %) と化合物 II (1.8 mg, purity 93.9 %) をそれぞれ得た。単離した化合物を GC/MS ならびに NMR を用いて同定した。

化合物 I ((Z)-ligustilide) : $^1\text{H-NMR}$ (400 MHz, CDCl_3) ppm : $\delta = 6.29$ (dt, $J = 9.7$ and 2.1 Hz, 1H), 6.00 (dt, $J = 9.4$ and 4.5 Hz, 1H), 5.22 (t, $J = 8.0$ Hz, 1H), 2.60 (td, $J = 9.7$ and 1.9 Hz, 2H), 2.50 - 2.43 (m, 2H), 2.38 (dt, $J = 7.6$ and 7.6 Hz, 2H), 1.51 (six, $J = 7.4$ Hz, 2H), 0.96 (t, $J = 7.4$ Hz, 3H); $^{13}\text{C-NMR}$ (100 MHz, CDCl_3) ppm : $\delta = 167.66, 148.61, 147.08, 129.90, 124.04, 117.16, 112.93, 28.15, 22.45$ (2C), $18.56, 13.80$.

GC/MS m/z : 190 (M^+ , 34), 161 (75), 148 (100), 133 (18), 106 (34), 105 (40), 55 (53).

化合物 II ((Z)-butylidenephthalide) : $^1\text{H-NMR}$ (400 MHz, CDCl_3) ppm : $\delta = 7.89$ (ddd, $J = 7.7, 0.8$ and 0.8 Hz, 1H), 7.70 - 7.63 (m, 2H), 7.51 (ddd, $J = 7.8, 6.6$ and 1.4 Hz, 1H), 5.64 (t, $J = 7.8$ Hz, 2H), 2.46 (dt, $J = 7.4$ and 7.5 Hz, 2H), 1.59 - 1.53 (m, 2H), 0.99 (t, $J = 0.99$ Hz, 3H); $^{13}\text{C-NMR}$ (100 MHz, CDCl_3) ppm : $\delta = 167.20, 145.78, 139.61, 134.18, 129.32, 125.27, 124.51, 119.61, 109.45, 27.79, 22.53, 13.80$.

GC/MS m/z : 188 (M^+ , 20), 159 (100), 146 (61), 131 (74), 104 (20), 103 (48), 77 (23), 76 (18).

2-3 結果および考察

ヤマトトウキの葉の乾燥パウダーより、連続蒸留抽出（SDE）法を用いて精油を調製し、GC/MS で分析した。70 の香気成分を検出した（**Fig. 3**）。精油中に $34.95 \pm 2.44 \%$ の主要成分を検出した。精油（1.2 g）をシリカゲルカラムクロマトグラフィーで精製し、主成分の画分を分離した。hexane/ethyl acetate（15:1）で溶出した画分を減圧濃縮し、245.5 mg の化合物 I を高純度で得た。化合物 I の構造は ^1H -NMR、 ^{13}C -NMR および 2D NMR スペクトルにより確認した。化合物 I はジヒドロフタリド骨格とブチリデン基を有する。ブチリデン基位置の二重結合の幾何構造は、NOESY スペクトルにおいて H-8 と H-4 の相関が認められたことから (Z)-体と決定した。したがって、パウダーから得られた精油の主成分は (Z)-ligustilide (**Fig. 4**) であった。また、同一画分からフタリド化合物（化合物 II）を単離した。化合物 II の構造は ^1H -NMR、 ^{13}C -NMR スペクトルにより (Z)-butylidenephthalide (**Fig. 4**) と決定した。

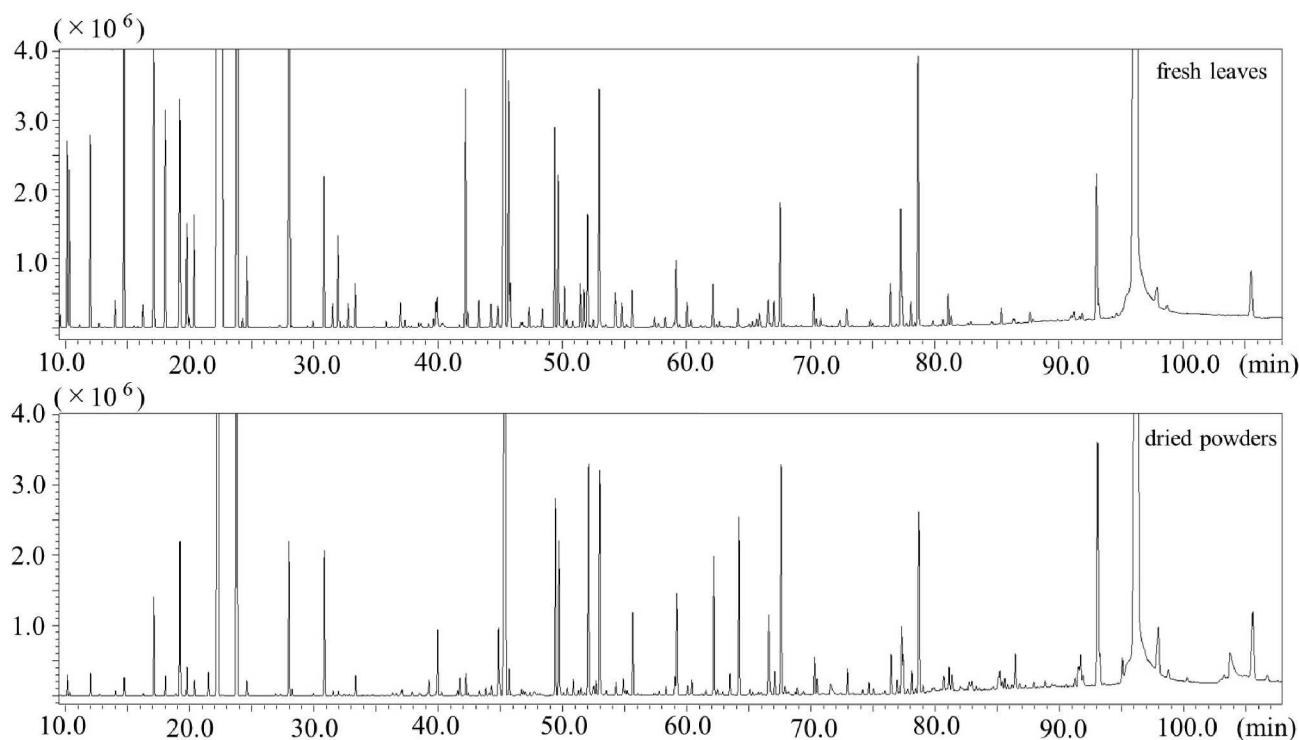


Fig. 3 ヤマトトウキの生葉（fresh leaves）ならびにその乾燥パウダー（dried powders）の精油のトータルイオンクロマト

パウダー精油中の香気成分を、RIs およびマススペクトルを標品ならびに文献と比較して同定した（**Table 1**）。13 種のセスキテルペン酸素化物、12 種のセスキテルペン炭化水素類、12 種のモノテルペン炭化水素類、9 種のモノテルペン酸素化物、7 種のフタリド類、4 種の脂肪族エステル類、4 種のノルイソプレノイド類、2 種の炭化水素類、2 種の脂肪酸、2 種の

脂肪族アルコール類、およびその他で構成されていた (**Table 1**)。フタリド類が 41.46 %を占め、次いでセスキテルペン炭化水素類 (19.45%)、モノテルペン炭化水素類 (18.74%) であった。パウダーの精油において、同定された最も主要な香気成分は(*Z*)-ligustilide (10.24 ± 2.27 mg/100 g 湿重量) であり、次いで β -caryophyllene (3.14 ± 0.17 mg/100 g 湿重量)、 γ -terpinene (2.68 ± 0.26 mg/100 g 湿重量)、*p*-cymene (1.96 ± 0.21 mg/100 g 湿重量) であった。butylphthalide も精油中に含まれていたが、その量 (0.10 ± 0.04 mg/100 g 湿重量) はごく微量であった。さらに、精油中の関連フタリドとして(*Z*)-butylidenephthalide、(*E*)-ligustilide、sedanenolide、(*E*)-butylidenephthalide、sedanonic acid lactone を同定した。

また、SDE 法により得られた生葉の精油を GC/MS で分析した結果、66 の香気成分を検出した (**Fig. 3**)。これらの香気成分は、13 種のセスキテルペン酸素化物、11 種のモノテルペン炭化水素類、11 種のセスキテルペン炭化水素類、11 種のモノテルペン酸素化物、7 種のフタリド類、4 種のノルイソプレノイド類、3 種の脂肪族エステル類、2 種の炭化水素類、1 種の脂肪族アルコール、その他で構成されていた (**Table 1**)。モノテルペン炭化水素類が 52.69 %を占め、次にフタリド類 (20.95 %) およびセスキテルペン炭化水素類 (10.63 %) が続いた。生葉の精油において、同定された最も主要な成分は γ -terpinene (24.26 ± 3.50 mg/100 g 湿重量) であり、次いで(*Z*)-ligustilide (12.59 ± 1.76 mg/100 g 湿重量)、*p*-cymene (4.74 ± 0.46 mg/100 g 湿重量)、 β -caryophyllene (4.15 ± 0.57 mg/100 g 湿重量) であった。

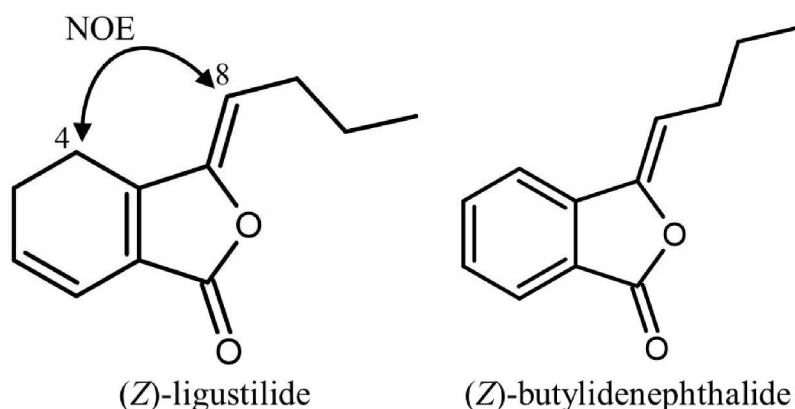


Fig. 4 ヤマトトウキの葉の乾燥パウダーより単離した (*Z*)-ligustilide と (*Z*)-butylidenephthalide

パウダーの精油は、生葉の精油に比べ、比較的沸点の低いモノテルペン炭化水素類の割合が低かったが、これはパウダーが加工される際に加熱乾燥工程を経ていることが寄与している可能性がある。さらに、パウダーの精油のみで検出された化合物についても、同様の加工方法が起因して生成した可能性がある。

Table 1 ヤマトトウキの生葉とその乾燥パウダーの精油の香気化合物

No.		RI	ID	powders		fresh leaves	
				area% (± SD)	wet mg/100g (± SD)	area % (± SD)	mg/100g (± SD)
Monoterpene hydrocarbons							
1	<i>α</i> -pinene	1023	RI, MS	0.11 (± 0.02)	0.03 (± 0.00)	0.79 (± 0.19)	0.54 (± 0.19)
2	<i>α</i> -thujene	1027	RI, MS	0.02 (± 0.01)	0.00 (± 0.00)	0.57 (± 0.04)	0.38 (± 0.07)
3	camphene	1067	RI, MS	0.13 (± 0.03)	0.04 (± 0.00)	0.91 (± 0.12)	0.61 (± 0.15)
4	sabinene	1124	RI, MS	0.10 (± 0.02)	0.03 (± 0.00)	1.52 (± 0.10)	1.01 (± 0.18)
5	<i>β</i> -myrcene	1167	RI, MS	0.56 (± 0.12)	0.16 (± 0.02)	1.78 (± 0.09)	1.18 (± 0.19)
6	<i>α</i> -terpinene	1184	RI, MS	0.12 (± 0.03)	0.03 (± 0.00)	1.08 (± 0.03)	0.71 (± 0.10)
7	limonene	1204	RI, MS	0.98 (± 0.21)	0.28 (± 0.03)	1.35 (± 0.20)	0.91 (± 0.24)
8	<i>β</i> -phelandrene	1213	RI, MS	0.18 (± 0.03)	0.05 (± 0.00)	0.57 (± 0.03)	0.38 (± 0.06)
10	(<i>Z</i>)- <i>β</i> -ocimene	1240	RI, MS	0.17 (± 0.03)	0.05 (± 0.00)	ND	
11	<i>γ</i> -terpinene	1252	RI, MS	9.40 (± 1.98)	2.68 (± 0.26)	36.61 (± 2.43)	24.26 (± 3.50)
12	<i>p</i> -cymene	1276	RI, MS	6.88 (± 1.53)	1.96 (± 0.21)	7.19 (± 0.57)	4.74 (± 0.46)
13	<i>α</i> -terpinolene	1288	RI, MS	0.10 (± 0.02)	0.03 (± 0.00)	0.31 (± 0.02)	0.20 (± 0.03)
subtotal				18.74	5.34	52.69	34.92
Monoterpene oxigenates							
17	camphor	1522	LRI, MS ³	0.53 (± 0.06)	0.15 (± 0.00)	0.15 (± 0.02)	0.10 (± 0.00)
18	linalool	1557	RI, MS	0.14 (± 0.02)	0.04 (± 0.00)	1.05 (± 0.09)	0.69 (± 0.02)
19	bornyl acetate	1588	LRI, MS ³	0.08 (± 0.01)	0.03 (± 0.00)	0.11 (± 0.02)	0.07 (± 0.00)
22	4-terpineol	1610	RI, MS	0.19 (± 0.02)	0.06 (± 0.00)	1.21 (± 0.13)	0.79 (± 0.02)
23	lavandulyl acetate	1612	LRI, MS ⁴	ND		0.18 (± 0.01)	0.12 (± 0.01)
26	lavandulol	1679	LRI, MS ⁴	ND		0.18 (± 0.02)	0.12 (± 0.00)
28	<i>α</i> -terpineol	1697	RI, MS	0.05 (± 0.01)	0.02 (± 0.00)	0.20 (± 0.01)	0.13 (± 0.01)
29	borneol	1700	LRI, MS ⁶	0.02 (± 0.00)	0.01 (± 0.00)	0.18 (± 0.01)	0.12 (± 0.01)
49	isothymol	2178	LRI, MS ⁴	0.38 (± 0.03)	0.11 (± 0.02)	0.21 (± 0.02)	0.14 (± 0.02)
51	thymol	2195	RI, MS	0.63 (± 0.04)	0.19 (± 0.03)	0.60 (± 0.06)	0.39 (± 0.05)
53	carvacrol	2213	LRI, MS ⁷	0.23 (± 0.02)	0.07 (± 0.01)	0.12 (± 0.01)	0.08 (± 0.01)
subtotal				2.27	0.66	4.19	2.76
Sesquiterpene hydrocarbons							
20	<i>β</i> -elemene	1597	RI, MS	0.62 (± 0.07)	0.18 (± 0.03)	0.11 (± 0.02)	0.07 (± 0.03)
21	<i>β</i> -caryophyllene	1606	RI, MS	10.90 (± 0.99)	3.14 (± 0.17)	6.25 (± 0.11)	4.15 (± 0.57)
24	(<i>E</i>)- <i>β</i> -farnesene	1668	RI, MS	1.57 (± 0.06)	0.46 (± 0.06)	1.22 (± 0.56)	0.84 (± 0.49)
25	<i>α</i> -humulene	1673	LRI, MS ⁵	1.42 (± 0.05)	0.41 (± 0.06)	0.78 (± 0.03)	0.51 (± 0.08)
27	<i>γ</i> -muurolene	1690	LRI, MS ⁵	0.16 (± 0.01)	0.05 (± 0.01)	0.04 (± 0.01)	0.03 (± 0.01)
30	germacrene D	1711	RI, MS	2.21 (± 0.08)	0.64 (± 0.08)	0.60 (± 0.05)	0.40 (± 0.08)
31	valencene	1719	RI, MS	0.11 (± 0.01)	0.03 (± 0.01)	0.04 (± 0.00)	0.03 (± 0.01)
32	<i>β</i> -selinene	1722	LRI, MS ³	0.12 (± 0.01)	0.04 (± 0.01)	ND	
33	(<i>Z,E</i>)- <i>α</i> -Farnesene	1728	LRI, MS ⁶	1.88 (± 0.07)	0.54 (± 0.07)	1.26 (± 0.13)	0.84 (± 0.19)
34	(<i>E,E</i>)- <i>α</i> -Farnesene	1752	RI, MS	0.12 (± 0.01)	0.03 (± 0.01)	0.20 (± 0.02)	0.13 (± 0.03)
35	<i>δ</i> -cadinene	1763	RI, MS	0.16 (± 0.01)	0.05 (± 0.01)	0.12 (± 0.02)	0.08 (± 0.01)
37	germacrene B	1839	RI, MS	0.18 (± 0.03)	0.05 (± 0.02)	0.02 (± 0.01)	0.02 (± 0.00)
subtotal				19.45	5.63	10.63	7.09

Table 1 Continued.

No.		RI	ID	powders		fresh leaves	
				area% (± SD)	wet mg/100g (± SD)	area % (± SD)	mg/100g (± SD)
Sesquiterpene oxgenates							
36	kessane	1777	MS	0.78 (± 0.06)	0.23 (± 0.05)	0.19 (± 0.03)	0.13 (± 0.03)
43	<i>cis</i> -caryophyllene oxide	1989	LRI, MS ⁹	0.25 (± 0.05)	0.07 (± 0.02)	0.12 (± 0.01)	0.08 (± 0.01)
44	<i>trans</i> -caryophyllene oxide	1999	LRI, MS ⁹	2.33 (± 0.14)	0.68 (± 0.14)	0.65 (± 0.03)	0.43 (± 0.07)
45	(<i>E</i>)-nerolidol	2052	RI, MS	0.34 (± 0.06)	0.10 (± 0.03)	0.14 (± 0.02)	0.09 (± 0.01)
46	Humulene epoxide II	2056	LRI, MS ¹²	0.15 (± 0.02)	0.05 (± 0.01)	0.04 (± 0.01)	0.02 (± 0.00)
48	spathulenol	2141	LRI, MS ¹	0.13 (± 0.03)	0.04 (± 0.01)	0.02 (± 0.00)	0.02 (± 0.00)
52	<i>t</i> -muurolol	2198	LRI, MS ⁵	0.37 (± 0.06)	0.11 (± 0.04)	0.10 (± 0.01)	0.06 (± 0.00)
55	α -eudesmol	2268	LRI, MS ¹⁴	0.14 (± 0.02)	0.04 (± 0.01)	0.02 (± 0.01)	0.02 (± 0.00)
56	(<i>E,E</i>)-farnesyl acetate	2277	LRI, MS ⁹	0.20 (± 0.05)	0.06 (± 0.02)	0.12 (± 0.03)	0.08 (± 0.02)
57	β -eudesmol	2282	LRI, MS ⁵	0.18 (± 0.04)	0.05 (± 0.02)	0.04 (± 0.01)	0.03 (± 0.01)
58	caryophylladienol II	2318	LRI, MS ¹⁴	0.11 (± 0.02)	0.04 (± 0.01)	0.02 (± 0.01)	0.01 (± 0.00)
59	(<i>E,E</i>)-farnesol	2368	RI, MS	0.12 (± 0.06)	0.04 (± 0.02)	0.06 (± 0.02)	0.04 (± 0.01)
60	eudesma-4(15),7-dien-1 β -ol	2396	LRI, MS ¹⁵	0.39 (± 0.08)	0.12 (± 0.04)	0.02 (± 0.01)	0.01 (± 0.00)
subtotal				5.48	1.61	1.52	1.02
Phthalides							
64	sedanonic acid lactone	2520	MS	0.15 (± 0.06)	0.04 (± 0.01)	0.04 (± 0.01)	0.03 (± 0.00)
65	(<i>Z</i>)-butylenephthalide	2545	RI, MS, NMR	3.31 (± 0.54)	0.98 (± 0.31)	0.91 (± 0.14)	0.60 (± 0.07)
66	butylphthalide	2547	RI, MS	0.34 (± 0.08)	0.10 (± 0.04)	0.08 (± 0.01)	0.05 (± 0.01)
68	(<i>Z</i>)-ligustilide	2610	RI, MS, NMR	34.95 (± 2.44)	10.24 (± 2.27)	19.10 (± 2.67)	12.59 (± 1.76)
70	sedanenolide	2638	RI, MS, NMR	0.97 (± 0.36)	0.29 (± 0.15)	0.26 (± 0.07)	0.17 (± 0.05)
71	(<i>E</i>)-butylenephthalide	2652	RI, MS	0.24 (± 0.11)	0.07 (± 0.03)	0.14 (± 0.05)	0.09 (± 0.03)
73	(<i>E</i>)-ligustilide	2727	MS	1.50 (± 0.36)	0.45 (± 0.18)	0.42 (± 0.11)	0.28 (± 0.07)
subtotal				41.46	12.17	20.95	13.82
Acids							
62	dodecanoic acid	2512	LRI, MS ¹⁶	0.35 (± 0.14)	0.10 (± 0.03)	ND	
72	tetradecanoic acid	2698	LRI, MS ¹⁶	0.88 (± 0.16)	0.26 (± 0.08)	ND	
subtotal				1.22	0.36	0.00	0.00
Norisoprenoids							
38	7,8-dihydro- β -ionone	1842	LRI, MS ⁸	0.94 (± 0.07)	0.27 (± 0.06)	0.30 (± 0.05)	0.20 (± 0.02)
39	geranyl acetone	1864	RI, MS	0.14 (± 0.02)	0.04 (± 0.01)	0.03 (± 0.01)	0.02 (± 0.00)
41	neophytadiene	1934	LRI, MS ¹⁰	1.60 (± 0.31)	0.47 (± 0.16)	0.08 (± 0.02)	0.05 (± 0.02)
69	phytol	2637	LRI, MS ⁵	0.49 (± 0.13)	0.15 (± 0.06)	0.12 (± 0.06)	0.08 (± 0.04)
subtotal				3.16	0.93	0.54	0.35
Aliphatic alcohols							
42	dodecanol	1980	LRI, MS ¹¹	0.92 (± 0.09)	0.27 (± 0.07)	0.17 (± 0.02)	0.11 (± 0.02)
50	tetradecanol	2188	LRI, MS ³	0.14 (± 0.04)	0.04 (± 0.02)	ND	
subtotal				1.06	0.31	0.17	0.11
Aliphatic esters							
40	dodecyl acetate	1896	LRI, MS ⁹	1.17 (± 0.13)	0.34 (± 0.09)	0.20 (± 0.03)	0.14 (± 0.04)
47	tetradecyl acetate	2105	LRI, MS ¹²	0.24 (± 0.07)	0.07 (± 0.03)	0.09 (± 0.02)	0.06 (± 0.01)
63	methyl linoleate	2516	RI, MS	0.47 (± 0.09)	0.14 (± 0.04)	0.08 (± 0.07)	0.05 (± 0.04)
67	methyl linolenate	2586	RI, MS	0.34 (± 0.06)	0.10 (± 0.03)	ND	
subtotal				2.23	0.66	0.37	0.25
Hydrocarbons							
14	dictyoptere <i>C'</i>	1339	LRI, MS ¹	1.04 (± 0.18)	0.30 (± 0.02)	4.41 (± 0.30)	2.93 (± 0.51)
15	<i>cis</i> -galbanolene	1399	LRI, MS ²	0.03 (± 0.00)	0.01 (± 0.00)	0.42 (± 0.03)	0.28 (± 0.05)
subtotal				1.07	0.30	4.83	3.21
Others							
9	(<i>E</i>)-2-hexenal	1222	RI, MS	0.09 (± 0.02)	0.03 (± 0.00)	0.42 (± 0.10)	0.28 (± 0.03)
16	armylbenzene	1420	LRI, MS ³	0.14 (± 0.02)	0.04 (± 0.00)	0.21 (± 0.02)	0.14 (± 0.02)
54	<i>p</i> -vinyl guaiaacol	2225	LRI, MS ³	1.82 (± 0.06)	0.53 (± 0.09)	1.43 (± 0.10)	0.95 (± 0.09)
subtotal				2.05	0.60	2.07	1.36
total				98.32	28.56	97.97	64.89

H.-C Chen et al. (台湾) は、水蒸気蒸留法により得られたトウキの生葉の精油の中で、*n*-butylphthalide (34.1 %) と γ -terpinene (23.4 %) が主要化合物であると報告した¹⁾。M. G. Cho et al. (韓国) は、SDE 法により得られたトウキの生葉の精油にも *n*-butylphthalide (63.88 %) と γ -terpinene (15.18 %) が含まれると報告し、韓トウキの精油では α -pinene (37.39 %)、germacrene D (14.39 %)、myrcene (8.53 %)、limonene (6.17 %) であった²⁾。一方、上記の2報とは異なり、J. Roh et al. (韓国) は、水蒸気蒸留法により抽出したトウキの生葉の精油において、最も主要な香気化合物が(*Z*)-ligustilide (46.54 %) であり、次いで 1-methyl-4-(1-methylethyl)benzene (12.13 %)、 γ -terpinene (10.76 %)、butylidenephthalide (10.12 %) であったことを示した³⁾。また、M.R. Kim et al. は、トウキおよび唐トウキの根から、butylidenephthalide (17.82 % および 14.27 %) および(*Z*)-ligustilide (5.78 % および 15.23 %) をそれぞれ同定したが、韓トウキにおいてはフタリド類は検出されなかった⁴⁾。本研究では、ヤマトトウキの葉の乾燥パウダーから、主要化合物として(*Z*)-ligustilide を、微量化合物として(*Z*)-butylidenephthalide を単離した。以上の結果は、*Angelica* の種間での交雑の可能性を示唆している。したがって、トウキは、漢方薬の原料や調味料として使用されるため、DNA シーケンス多型を用いた種の識別の必要性やその作用機序を実証することが不可欠である。

第3章 ヤマトトウキ (*Angelica acutiloba* Kitagawa) の香気化合物の有翅ワタアブラムシ (*Aphis gossypii* Glover) に対する誘引活性の解析

3-1 序論

Angelica acutiloba Kitagawa (日本ではトウキとして知られる) はセリ科に属する多年草で、茎は赤みを帯びた紫色を呈し、草丈は約 0.4~1.0 m に成長する。現在では、奈良県、北海道、富山県、そして群馬県は、日本におけるトウキの主要な産地である。本植物は主に、進化系統種と、生育地域において独自に維持、選抜されてきた在来品種で構成される。特に、奈良県産 (ヤマトトウキ) は品質が優れているとされている。根は刺激的な香りと苦味ならびにわずかな甘味を有し、日本の多くの漢方薬の原料として用いられている。生薬の根の成分は、婦人科疾患の改善、強壮に効果がある。加えて、深緑色でセロリのような香りを有する生薬とその乾燥パウダーは、お茶や調味料として利用される。台湾と韓国におけるトウキの葉と根の成分に関する報告が認められる¹⁻⁴⁾。台湾のグループはトウキの葉の主要化合物を *n*-butylphthalide と同定したのに対し、韓国のグループは *ligustilide* を同定した。我々は、日本でヤマトトウキの生薬ならびに乾燥パウダーの香気成分をはじめて調査し、異なる産地のトウキの成分と比較した²⁸⁾。我々の研究では、連続蒸留抽出法を用いてヤマトトウキの葉の乾燥パウダーから精油を抽出し、GC/MS を用いて分析した。フタリド類が精油成分の 41.46 % を占め、次いでセスキテルペン炭化水素類 (19.45 %)、モノテルペン炭化水素類 (18.74 %) であった。精油中の最も主要な成分は、34.95 % で検出され、シリカゲルカラムクロマトグラフィーを用いてこの化合物を単離し、1D および 2D NMR により (*Z*)-*ligustilide* と決定した。

アゲハチョウ、ゾウムシの幼虫、アブラムシはトウキの葉を好む。キアゲハ (*Papilio machaon* Linnaeus (Lepidoptera: Papilionidae)) およびシロイチモジヨトウ (*Spodoptera exigua* Hübner (Lepidoptera: Noctuidae)) は、セリ科の葉の既知の害虫である⁵⁻⁷⁾。キアゲハはセリ科植物のスペシャリストであり、特にトウキの葉を好んで産卵する傾向がある。これらの害虫はトウキに深刻な被害をもたらし、摂食が葉の数を減らすだけでなく、光合成を不十分にもし、漢方薬の原料として使用される根の成長不良を引き起こす。アブラムシは若芽や若葉に寄生し、枯死や変形を引き起こす。ニンジンフタオアブラムシ (*Cavariella aegopodii* Scopoli (Hemiptera: Aphididae)) やコウノフタオアブラムシ (*Cavariella konoi* Takahashi (Hemiptera: Aphididae)) などのスペシャリストの種、ならびにワタアブラムシ (*Aphis gossypii* Glover (Hemiptera: Aphididae)) やモモアカアブラムシ (*Myzus persicae* Sultzer (Hemiptera: Aphididae)) などのジェネラリストの種も、セロリ (*Apium graveolens* L.) やノラニンジン (*Daucus carota* L.) などのセリ科作物に寄生し繁殖することが知られている²⁹⁻³¹⁾。しかし、トウキの根は漢方薬に用いられるため、従来の農薬による一般的な防除は不可能である。その結果、防除方

法は現在、手作業による駆除や認可された一部の農薬の散布に限られている。

昆虫は、宿主植物を探索および認識するために、視覚的ならびに嗅覚的シグナルの両方を利用する⁸⁾。宿主植物の葉³²⁾、花³³⁾、根³⁴⁾、そして果実³⁵⁾由来の香気化合物は害虫を誘引し、これらの害虫の行動的反応は、精油またはその主要成分を用いた野外試験、Y字管型嗅覚測定装置を用いた生物試験、あるいはガスクロマトグラフィー／電気触角電図法による試験で調査されている^{36,37)}。トウキなどのセリ科植物由来の香気化合物は、害虫を誘引し、葉への産卵を誘導する⁹⁻¹¹⁾。例えば、キアゲハの雌成虫は、産卵のためにセリ科植物由来の香気化合物を利用する。北米に広く分布するキアゲハの姉妹種である *P. polyxenes* においては、セリ科植物由来の香気化合物が雌成虫の着陸率と産卵数を増加させる。セリ科植物のスペシャリストであるニンジンフタオアブラムシ^{31,38)}は、キャラウェイ (*Carum carvi*) 由来の *carvone* に誘引される。さらに、唐トウキ (*Angelica sinensis*) の根の香気化合物の主成分である 3-*n*-butylphthalide は、貯蔵穀物甲虫ジンサンシバンムシ (*Stegobium paniceum* Linnaeus) (Coleoptera: Anobiidae) を誘引する³⁹⁾。これらの知見は、トウキの葉から放出される香気化合物も害虫を誘引する可能性を示唆している。ヤマトトウキの葉より誘引活性化合物が同定されれば、ヤマトトウキの害虫を効果的に誘殺する誘引剤として利用することができる可能性がある。

そこで本研究では、ヤマトトウキの葉から得られた精油中の香気化合物およびその主要成分に対する害虫の行動的反応を評価する野外試験をヤマトトウキの圃場で実施した。また、研究室内で Y 字管嗅覚測定装置を用いた生物試験も行った。

3-2 実験材料および手法

3-2.1 材料

ヤマトトウキの葉の乾燥パウダーは、2022 年 6 月および 2023 年 7 月に、農業組合法人うもれ木の郷（山口県）から提供を受けた。サンプルは、使用まで -20°C で保存した。使用した化学物質および溶媒はすべて特級であった。

3-2.2 昆虫

ワタアブラムシおよびモモアカアブラムシは、住友化学テクノサービス(株)から入手し、春から夏にかけて、温度と湿度を管理した自然光周期の環境下で、エンドウの苗を餌として飼育した。嗅覚測定装置による試験および実験には、無翅胎生雌虫を使用した (Fig. 5)。

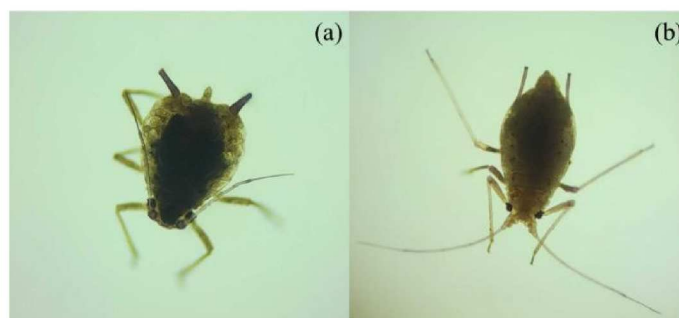


Fig. 5 無翅ワタアブラムシ成虫 (a) と無翅モモアカアブラムシ成虫 (b)

3-2.3 ヤマトトウキの精油の調製

ヤマトトウキの葉の乾燥パウダーの精油は、連続蒸留抽出 (SDE) 法により調製した。乾燥パウダー (10 g) を蒸留水 (100 mL) とともに摩砕し、直ちに pentane : CH₂Cl₂ = 2 : 1 (150 mL) を用いて 1.5 時間抽出した。無水 Na₂SO₄ で乾燥後、抽出物を濃縮し、44.20 ± 1.64 mg の精油 (収率 0.44 ± 0.02 % (w/w)) を得た²⁸⁾。精油は使用まで N₂ 下で -20°C で保存した。

3-2.4 ヤマトトウキの精油からの (Z)-ligustilide の単離

ヤマトトウキの葉の乾燥パウダーから得られた精油 (1.2 g) を、hexane/ethyl acetate (15:1、3:1) を溶出溶媒として用いたシリカゲルカラムクロマトグラフィーで精製し、無色油状の (Z)-ligustilide (245.5 mg, purity 93.4 %) を得た。単離した化合物は、GC-MS および NMR を用いて同定した²⁸⁾。

3-2.5 三種類のトラップを用いた害虫捕獲の野外試験

野外試験を、山口県阿武町 (34.507549°N, 131.564524°E) のヤマトトウキの圃場において、2023 年から 2025 年までの 3 年間、春から秋の栽培期 (5 月から 10 月) に実施した。アゲハチョウを捕獲するためにデルタトラップを、ヨトウを捕獲するためにファネルトラップを、そしてアブラムシを捕獲するために黄色粘着トラップを用いた。2023 年に予備試験を実施し、3 種類のトラップに精油を加えて処理トラップとして設置し、精油未処理の対照トラップを一定間隔で設置した。ファネルおよびデルタトラップは支柱から吊るし、トウキの生育に合わせて高さを調整した。黄色粘着トラップは畝に設置した。本実験で使用した精油および (Z)-ligustilide の濃度は先行研究⁴⁰⁻⁴³⁾に基づき決定した。処理トラップでは、各トラップの中央に、triethyl citrate (270 μL) に溶解したサンプル溶液 (30 μL) を加えたセプタムを設置した。対照トラップでは、溶媒 (triethyl citrate、300 μL) のみを加えたセプタムを設置した。各トラップで捕獲された害虫の数は 7 日間連続して記録した。実験の信頼性を高めるため、各試験では処理トラップと対照トラップの位置を入れ替えて実施し、3 反復行った。2024 年から 2025 年の試験では、3 種類の処理トラップ (精油処理) を 1 群とした 3 群 (3 ケ所) を、3 種類の対照トラップ (溶媒のみ) を 1 群とした 3 群 (3 ケ所) をそれぞれ設け、各群

を一定間隔で設置した。各群の位置は試験ごとにランダムに変更した。各トラップで捕獲された害虫の数は7日間連続して記録した。捕獲試験は、2024年は5反復、2025年は3反復行った。加えて、2025年には、triethyl citrate (270 μ L) に溶解した(Z)-ligustilide (30 μ L) 溶液を処理に用いた試験も行った。

3-2.6 Y字型嗅覚測定装置を用いたアブラムシの選択試験

アブラムシの選択試験は、Fernández-Grandon et al.⁴⁴⁾の方法に若干の修正を加え、Y字型嗅覚測定装置を用いて実施した。Y字型嗅覚測定装置は内径1 cm、アーム長10 cm、角度60°で設計された。ポンプで供給される空気は活性炭でろ過され、蒸留水で加湿された。気流は200 mL/minに調整され、2方向に分割された。分割された気流は、直径6 cmのろ紙を含んだ二つのフラスコを経由してY字管に導入された。一方のろ紙にはtriethyl citrateで希釈した0.005%精油溶液(10 μ L)を加え、他方のろ紙には溶媒(10 μ L)のみを加えた。全ての装置はシリコンチューブ(内径5 mm及び8 mm)で接続された。

ワタアブラムシまたはモモアカアブラムシの無翅胎生雌虫1頭をアルミ線上に置き、観察のためにY字管に導入した。各無翅アブラムシは5分間観察した。アブラムシがY字管の精油側または無臭側のアームの5 cmラインのいずれかを超えて移動した場合、その行動は「選択(誘引または忌避)」とみなした。ただし、5分以内にラインを越えなかった場合は「非選択」とみなした。10頭のアブラムシを用いた各試験後、におい源を含むフラスコの位置を入れ替えた。さらに、20頭のアブラムシを観察した後は、フラスコとY字管を無香料洗剤で洗浄し、150°Cで20分間乾燥させた後、再設置し、新しいシリコンチューブで接続した。試験は、9:00から18:00の間に、遮光カーテン内のLED昼光灯下で実施した。

3.2-7 統計解析

統計解析はRバージョン4.5.1 (Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2024)を用いて実施した。各試験において、Shapiro・Wilk検定で正規性を評価し、F検定で分散の等質性を判定した。全てのデータセットがこれらの仮定を満たしたため、処理群と対照群の差はスチューデントのt検定を用いて評価した。Y字管嗅覚測定装置試験において、アブラムシが対照よりもにおい源を好むかどうかを、カイ二乗(χ^2)検定を用いて決定した。

3-3 結果および考察

3年間の研究期間を通じて、処理区または対照区のいずれにおいても、ファネルトラップおよびデルタトラップに成虫のキアゲハやヨトウは捕獲されなかった。一方で、2023年の試験では、精油処理(EOs)した黄色粘着トラップに、対照(control)の黄色粘着トラップよりも有意に多くの有翅アブラムシが捕獲された(**Fig. 6**)。この結果は、アブラムシが精油に誘引されることを示した。試験は5月、7月、9月に実施したが、5月(精油:対照=25:18)と9月(精油:対照=37:13)にはアブラムシの捕獲数が極めて少なかった。7月の夏

季に設置した処理の黄色粘着トラップ（232）では、対照の黄色粘着トラップ（176）よりも多くのアブラムシが捕獲された。

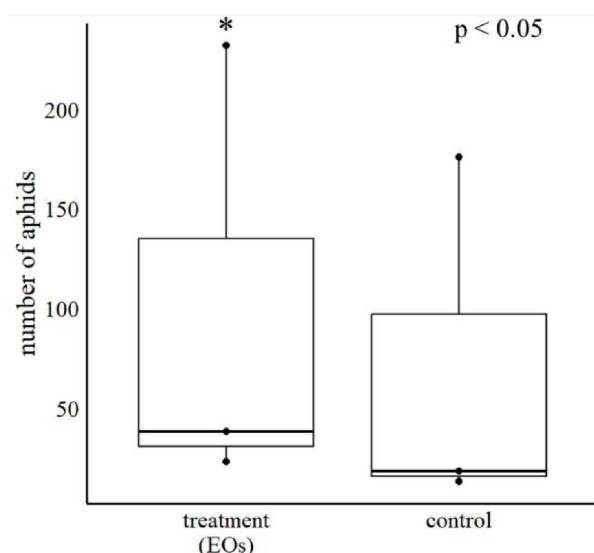


Fig. 6 2023 年に実施した野外試験における精油処理と対照の黄色の粘着トラップに捕獲されたアブラムシの数

2024 年に実施した野外試験では、アブラムシの発生数が極めて少なかったため、処理群（EOs）の黄色粘着トラップと対照群（control）の黄色粘着トラップとの間で、アブラムシの捕獲数の有意差は認められなかった（**Fig. 7**）。一方で、2025 年に精油を用いて実施した野外試験では、過去 2 年間よりも多くの有翅アブラムシが捕獲され、処理群（EOs）の黄色粘着トラップでは対照群（control）の黄色粘着トラップよりも有意に多くのアブラムシが捕獲された（**Fig. 8**）。捕獲された有翅アブラムシの種は、形態的特徴に基づき顕微鏡下で同定した。額瘤は弱く発達していた。触角第 3～6 節の相対長は、26 : 17 : 16 : 10+32 であり、触角第 3 節には 6～8 個の二次感覚器が一行に存在した。これらに加え、尾片の形状と毛の数も、購入した有翅ワタアブラムシ（*Aphis gossypii* Glover）の特徴と一致していた。これらの観察結果から、トラップで捕獲された有翅アブラムシの大半がワタアブラムシ（**Fig. 9**）であると同定した。さらに、精油から単離した(Z)-ligustilide で黄色粘着トラップを処理した場合、この化合物を用いた場合のアブラムシの捕獲数は精油使用時より少なかったが、処理群（(Z)-ligustilide）の黄色粘着トラップでは対照群（control）の黄色粘着トラップより有意に多くのアブラムシが捕獲された（**Fig. 8**）。

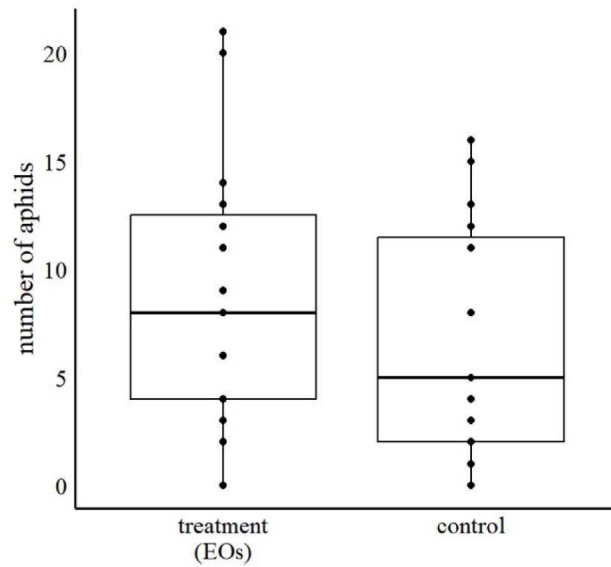


Fig. 7 2024 年に実施した野外試験における精油処理と対照の黄色の粘着トラップに捕獲されたアブラムシの数

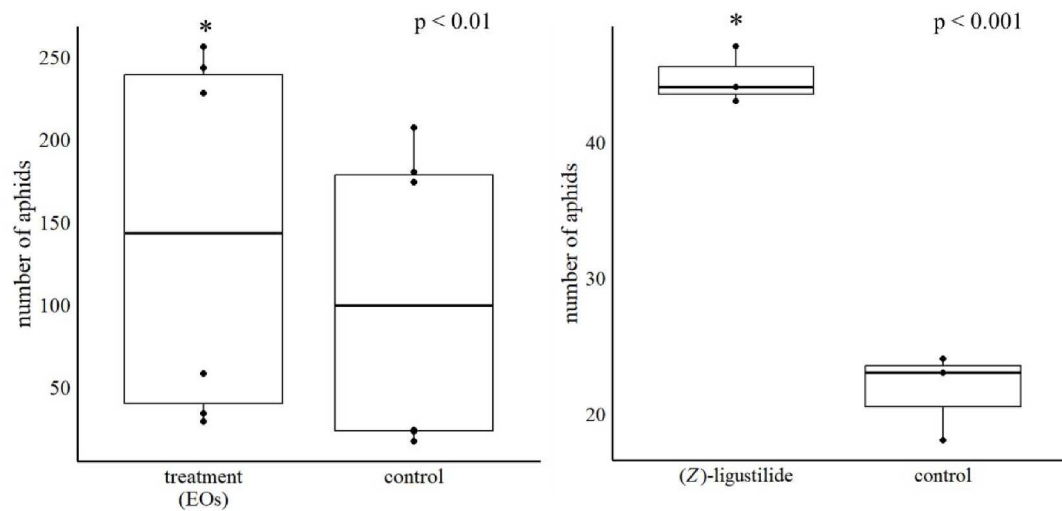


Fig. 8 2025 年に実施した野外試験における精油処理と対照の黄色の粘着トラップに捕獲されたアブラムシの数 (左) ならびに (Z)-ligustilide 処理と対照の黄色の粘着トラップに捕獲されたアブラムシの数 (右)



Fig. 9 トラップで捕獲されたワタアブラムシ

さらに、Y字管嗅覚測定装置を用いて無翅ワタアブラムシ ($\chi^2 = 1.88$, $df = 1$, $P = 0.17$) の二選択応答について試験したところ、誘引や忌避といった有意な行動反応は認められなかった (Fig. 10)。また、無翅モモアカアブラムシにおいても同様の結果が得られた ($\chi^2 = 0.75$, $df = 1$, $P = 0.38$)。

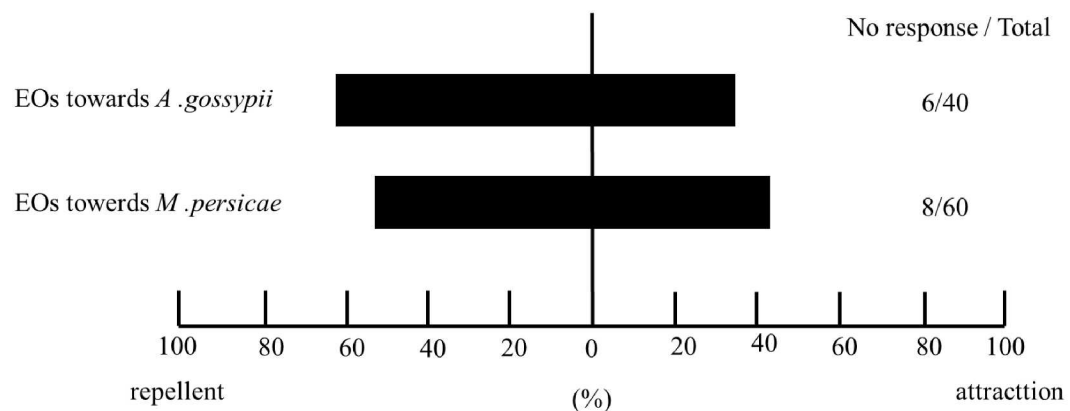


Fig. 10 Y字管嗅覚測定装置を用いたワタアブラムシとモモアカアブラムシの無翅胎生雌虫の精油の選択試験

アブラムシは有翅型（飛行可能）と無翅型（歩行のみ可能）の2形態を示す。いずれの形態も、師管から師管液を吸汁することで植物に直接的被害を与え、病原性ウイルスの媒介による間接的被害も引き起こす。有翅型は、植物の状態の悪化、アブラムシ個体群密度の増加

に依拠して、さらに、短日条件などの要因により有性生殖が必要になるときに積極的に出現する。その後、新たな寄主へ飛翔し、ウイルス病を広く媒介する⁴⁵⁾。無翅型では単為生殖により短期間で急速かつ爆発的に増殖する。防除対策が遅れると、急速に分散し、重大な作物被害と経済的損失をもたらす。これまで、ニコチン性アセチルコリンアゴニストやナトリウムチャンネルを阻害する、ネオニコチノイド系やピレスロイド系殺虫剤がアブラムシに対して用いられてきた。しかし、アブラムシは単為生殖により殺虫剤耐性を急速に獲得し、その効果に対する耐性を発達させるため、殺虫剤を無効化する。殺虫剤の使用は、アブラムシの天敵などの非標的昆虫に悪影響を与え、生態系のバランスを崩す。これらの理由から、ヤマトトウキの圃場におけるアブラムシ防除は困難である。したがって、殺虫剤のみに依存しない新たな防除法の開発が必要である。

2023 年および 2025 年の野外試験では、ヤマトトウキの葉のパウダーの精油または(Z)-ligustilide を塗布した黄色粘着トラップにおいて、有翅アブラムシの捕獲数が有意に増加した。これはアブラムシがパウダーの精油の香気化合物や(Z)-ligustilide に誘引されることを示唆している。Rüde et al.は、機械的損傷や摂食損傷を受けた寄主植物の葉から放出される香気化合物が、キャベツ茎ノミハムシ (*Psylliodes chrysocephala*) などの害虫を誘引することを報告しており⁴⁶⁾、同様の効果がモモアカアブラムシに対しても報告されている^{47, 48)}。さらに、アブラムシが媒介するウイルスに感染した植物では、香気化合物が変化し、同種の他のアブラムシがこれを好むことが確認されている⁴⁹⁾。

アブラムシの発生は季節や年によって変動する⁵⁰⁾。本研究では、3 年間にわたる野外試験においてアブラムシの発生率に差異が認められた：5 月(43, 84, 185)；7 月および 8 月(408, 97, 1,288)；9 月および 10 月(50, 56, 199)。具体的には、2023 年と 2025 年の発生数が多く、2024 年は少なかった。さらに、アブラムシ捕獲数の月変動を調査した結果、7 月から 8 月にかけて急増する傾向が明らかになった。2025 年の野外試験では、(Z)-ligustilide を用いた試験は、精油を用いた試験よりもアブラムシの捕獲数が少なくなったが、これは試験時期の違いによるアブラムシの発生数に起因している可能性があり、それぞれの誘引活性に違いがあったかどうかは、不明である。本研究の野外試験で認められたアブラムシの発生数の年ならびに月変動から、ヤマトトウキの栽培において、認可された一部の農薬の最適散布時期を検討するために、精油と(Z)-ligustilide が発生予測に活用可能であることを示唆している。

一般的に、アブラムシは、温暖環境では不完全生活環（無性生殖）を示し、一方で寒冷地域では、異宿主型または同宿主型の完全生活環（有性生殖）をとる。異宿主型生活環では、アブラムシは春に一次寄主から二次寄主へ移動し、秋に産卵のため一次寄主へ回帰する。本研究では、5 月から 10 月にかけての野外試験で捕獲されたアブラムシの大半が有翅ワタアブラムシと同定された。したがって、その有翅胎生雌虫が、精油中の香気化合物に誘引され、二次寄主種としてトウキを選んでしていると予測した。

アブラムシは、普遍的または宿主特異的な香気化合物を宿主探索の手がかりとして利用する。嗅覚試験および野外試験において、ダイコン (*Raphanus sativus*) 由来の 4-methylthio-

3-butenyl isothiocyanate が、多くの植物に寄生するジェネラリストアブラムシのモモアカアブラムシに対して誘引または定着行動を誘発することが確認された³⁸⁾。Shivaramu et al.は、嗅覚試験と野外試験を通じて、バジルの精油 (estragole) が有翅ワタアブラムシに対して誘引活性を有することを確認した⁴²⁾。さらに、ワタやハクサイを二次寄主として好む有翅胎生雌虫ワタアブラムシはリモネンに誘引される⁵¹⁾。ネギ科のスルフィドのような特徴的な香気化合物は、ネギ科植物のスペシャリストのアブラムシであるネギアブラムシ (*Neotoxoptera formosana*) を誘引し、一方、キャラウェイ精油の特徴的な香気成分である carvone は、スペシャリストアブラムシであるニンジンフタオアブラムシに対して同様の効果を示す^(32, 38)。これらの *Cavariella* アブラムシは、セリ科作物に寄生するスペシャリストであるが、本研究の野外試験では観察されなかった。本研究では精油と (Z)-ligustilide がワタアブラムシを誘引したが、*Cavariella* に対しても同様の効果を示す可能性がある。

本研究において、Y字管嗅覚測定装置を用いた試験では、無翅アブラムシは香気化合物に対して有意な行動応答を示さなかった。有翅アブラムシは宿主植物を見つけるための手がかりとして香気化合物を利用し、一方で無翅アブラムシは既に宿主上に定着しており、主に摂食と繁殖に特化した行動を示すため、香気化合物の誘引効果が観察されなかったことが示唆される。

野外試験ではヨトウの成虫や幼虫は観察されず、それらに起因する葉の損傷の兆候も認められなかった。キアゲハ成虫の飛翔および産卵行動やその幼虫による葉の損傷は観察されたが、鱗翅目害虫の捕獲に一般的に使用されるデルタトラップでは成虫は捕獲されなかった。それゆえ、トラップの種類がキアゲハの捕獲に適していなかったのか、あるいは精油に誘引されなかったのかどうかは不明である。

Push-pull 戦略に基づく植物由来の防除資材と精油の利用は、環境に優しく効果的な害虫管理技術として大きな注目を集めている。香気化合物は、ワタアブラムシに対して忌避作用を示し⁵²⁾、フラボノイドは摂食抑制、阻害、成長抑制効果を示す⁵³⁾。また、本研究では、ヤマトウキの葉の精油ならびに (Z)-ligustilide は、少なくとも7日間の誘引効果が示唆されたが、マイクロファイバーへの添加やマイクロカプセル化を行うことで徐放性を向上させ、効果をより長く持続させることが期待される。本研究の結果は、害虫管理のための大量駆除や予測システムなどの殺虫剤に依存しない効果的な防除法が、ヤマトウキの葉の精油または (Z)-ligustilide を用いて開発される可能性を示唆している。

総括

ヤマトトウキ (*Angelica acutiloba* Kitagawa) の生葉とその乾燥パウダーより精油を調製し、GC/MS 分析を行った。乾燥パウダーの精油より主要な成分 ($34.95 \pm 2.44 \%$) を検出し、この成分を精油からシリカゲルカラムクロマトグラフィーにより単離し、各種 NMR により (Z)-ligustilide と決定した。生葉の精油より 66 成分を、乾燥パウダーの精油より 70 成分を同定した。生葉の精油では、モノテルペン炭化水素類が 52.69 % を占め、次にフタリド類 (20.95 %) およびセスキテルペン炭化水素類 (10.63 %) が続いた。乾燥パウダーの精油では、フタリド類が 41.46 % を占め、次いでセスキテルペン炭化水素類 (19.45 %)、モノテルペン炭化水素類 (18.74 %) であった。これまで、台湾や韓国の研究グループがトウキの主要フタリド類に関して報告していたが、そのトウキの種は不明であった。本研究により、ヤマトトウキの主要フタリド類は、それらの報告との相違が認められ、*Angelica* の種の治療効果とその作用機序を解明するには、関連フタリド類の組成調査が必要であることが明らかとなった。

また、ヤマトトウキの圃場で害虫に対する葉の香気成分の活性試験を行った結果、有翅ワタアブラムシ (*Aphis gossypii* Glover) が、乾燥パウダーの葉の精油に有意に誘引され、さらにその精油の主要成分である (Z)-ligustilide にも有意に誘引された。Y 字管嗅覚測定装置を用いた無翅ワタアブラムシによる精油の選択試験を行ったところ、特異な行動は認められなかった。以上の活性試験の結果から、精油ならびにその主要成分の (Z)-ligustilide は、有翅型のみに対して誘引活性を示した。ヤマトトウキの精油や (Z)-ligustilide を用いることで、殺虫剤を使わずに大量駆除や個体群動態のモニタリングが可能になる可能性がある。

摘要

トウキ (*Angelica acutiloba* Kitagawa) はセリ科の多年生草本であり、奈良県産のものはヤマトウキと呼ばれる。その根は婦人科系疾患の改善、強壮などのために漢方薬の原料として利用されてきた。近年、その生葉およびそれを加熱乾燥したパウダーがセロリのような香調を有することから、お茶や調味料として利用されるようになってきた。一方、その葉はキアゲハ、アブラムシ、ヨトウなどによる食害を受ける。しかしながら、ヤマトウキは根が漢方薬の原料となるため、農薬の使用には制限があり、さらに害虫は薬剤抵抗性を発達させるため、殺虫剤に依存しない防除法の確立が求められている。これまでの報告で、ヤマトウキと同じセリ科植物において、害虫に対して誘引活性を有する香気成分が特定されている。本研究では、ヤマトウキの葉の香気成分の同定ならびに害虫に対する誘引活性化合物の特定を目的とした。

ヤマトウキの葉の乾燥パウダーから、連続蒸留抽出 (SDE) 法を用いて精油を抽出し、GC/MS で分析した。精油中のフタリド類は 41.46 % を占め、次いでセスキテルペン炭化水素類 (19.45 %)、モノテルペン炭化水素類 (18.74 %) であった。精油中の主成分 (34.95 %) をシリカゲルカラムクロマトグラフィーで単離し、1D および 2D NMR により (Z)-ligustilide と決定した。また、マイナーなフタリド類として (Z)-butylideneohtalide の単離にも成功した。SDE 法で生葉から抽出した精油では、モノテルペン炭化水素類が 52.69 % を占め、次いでフタリド類 (20.95 %)、セスキテルペン炭化水素類 (10.63 %) であった。GC/MS 分析により、最も主要な香気成分は γ -terpinene、次いで (Z)-ligustilide、*p*-cymene、 β -caryophyllene と同定された。

次に、2023 年から 2025 年に、ヤマトウキの圃場で作物の生育期である春から秋に、害虫に対するトラップを用いた野外実験を実施した。2023 年の予備試験では、葉から抽出した精油を粘着トラップに塗布したところ、対照トラップと比較して有翅アブラムシの捕獲数が増加した。2024 年はアブラムシの数が極端に少なく、精油処理トラップと対照トラップ間でその数に有意差は認められなかった。しかし、2025 年にはアブラムシの個体数が増加し、精油処理トラップでは対照トラップより有意に多くのアブラムシが捕獲された。捕獲された有翅アブラムシの大半はワタアブラムシ (*Aphis gossypii* Glover) であった。精油から単離した (Z)-ligustilide を用いたさらなる試験では、処理トラップが対照トラップより有意に多くのアブラムシを捕獲した。Y 字型嗅覚測定装置を用いた二選択応答試験では、無翅ワタアブラムシに対する顕著な行動反応 (誘引・忌避など) は認められなかった。本研究の結果は、ヤマトウキにおける有翅アブラムシを捕獲するための精油あるいは (Z)-ligustilide の利用が、これらの害虫を管理する環境に優しい効果的な方法となり得ることを示唆している。

Summary

Angelica acutiloba Kitagawa is a perennial herb of the *Apiaceae* family and it from Nara prefecture, Japan is called by “Yamato-tōki”. The roots have a pungent aroma and a bitter and slightly sweet taste and are used as ingredients in many herbal medicines in Japan. The constituents of the roots in herbal medicine are effective in treating gynecological disorders, analgesia, and tonicity. In addition, the fresh leaves and their dried powders, which have a deep green color and celery-like aroma, are used in teas and seasonings. On the other hands, the leaves are suffered feeding damage by *Papilio machaon* Linnaeus (Lepidoptera: Papilionidae), aphids and *Spodoptera exigua* Hübner (Lepidoptera: Noctuidae). However, conventional pesticides cannot be used for pest control in *A. acutiloba* because its roots are used in herbal medicine. Previous researches have been identified attractive aroma compounds (ACs) towards pest in *Apiaceae* plants. This study aimed to investigate the ACs in *A. acutiloba* Kitagawa (Yamato-tōki) and identify the attractive compounds towards their pest.

Essential oils (EOs) were extracted from the dried powders of leaves in *A. acutiloba* Kitagawa using a simultaneous distillation extraction (SDE) technique and analyzed using GC/MS. The phthalides in the EOs were accounted for 41.46 %, followed by sesquiterpene hydrocarbons (19.45 %) and monoterpene hydrocarbons (18.74 %). A major component in the oils, detected at 34.95%, was isolated using silica gel column chromatography and determined as (*Z*)-ligustilide using 1D and 2D NMR spectroscopy. We also purified (*Z*)-butylidenephthalide as the minor phthalide. In the oils extracted from fresh leaves using SDE, the monoterpene hydrocarbons were accounted for 52.69 %, followed by phthalides (20.95 %) and sesquiterpene hydrocarbons (10.63 %). The most dominant AC identified was γ -terpinene, followed by (*Z*)-ligustilide, *p*-cymene and β -caryophyllene using GC/MS.

We conducted field experiments using sticky traps during the growing period from 2023 to 2025 to assess the physiological responses of pests in relation to the ACs from *A. acutiloba* Kitagawa. In a preliminary trial in 2023, EOs from *A. acutiloba* Kitagawa leaves were applied to sticky traps, which captured more winged aphids than untreated control traps. In 2024, no significant differences were observed between the EO-treated and control traps owing to the extremely low number of aphids. However, in 2025, aphid abundance increased and significantly more aphids were captured in the EO-treated traps than in the untreated traps. Most of the captured winged aphids were *Aphis gossypii* Glover (Hemiptera: Aphididae). In a follow-up experiment, traps treated with (*Z*)-ligustilide, isolated from the EOs, captured significantly more aphids than the control traps. A two-choice response test using a Y-tube olfactometer showed no significant behavioral responses (such as attraction or avoidance) toward the wingless aphid *A. gossypii*. The findings of the present study suggest that developing EOs to capture winged aphids on *A. acutiloba* or (*Z*)-ligustilide may be an environmentally friendly and effective way to manage these insects.

謝辞

本研究を行うにあたり、多年ご指導、ご鞭撻を賜りました山口大学大学院創成科学研究科教授赤壁善彦先生に厚く御礼申し上げます。

実験圃場のご提供ならびに写真撮影等ご協力いただきました、農業組合法人うもれ木の郷の黒川慶子様、田中敏雄様、中野克美様をはじめ皆様に厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり支援を受けた JST-SPRING 事業（Grant Number JPMJSP 2111, Project on Training of Doctoral Students at Yamaguchi University through Interdisciplinary Research Practice）に厚く御礼申し上げます。

引用文献

1. Chen, H.-C.; Tsai, Y.-Jr; Lin, L.-Y.; Wu, C.-S.; Tai, S.-P.; Chen, Y.-C. and Chiang, H.-M. Volatile compounds from roots, stems and leaves of *Angelica acutiloba* growing in Taiwan. *Nat. Prod. Comm.* **9**, 583-586 (2014).
2. Cho, M.G.; Bang, J.K.; Chae, Y.A. Comparison of volatile compounds in plant parts of *Angelica gigas* Nakai and *A. acutiloba* Kitagawa. *Korean J. Medicinal Crop Sci.* **11**, 352-357 (2003).
3. Roh, J.; Lim, H.; Shin, S. Biological activities of the essential oil from *Angelica acutiloba*. *Nat. Prod. Sci.* **18**, 244-249 (2012).
4. Kim, M.R.; Abd El-Aty, A.M.; Kim, I.S.; Shim, J.H. Determination of volatile flavor components in danggui cultivars by solvent free injection and hydrodistillation followed by gas chromatographic–mass spectrometric analysis. *J. Chromatogr. A* **1116**, 259-264 (2006).
5. Berdegue, M.; Trumble, J.T. Effects of plant chemical extracts and physical characteristics of *Apium graveolens* and *Chenopodium murale* on host choice by *Spodoptera exigua* larvae. *Entomol. Exp. Appl.* **78**, 253–262 (1996).
6. Kato, R.; Morita, Y.; Ina, A.; Tatsuo, Y.; Tamura, T.; Tezuka, Y.; Tanaka, K. Metabolomic and proteomic Analysis of the response of *Angelica acutiloba* after herbivore attacks. *Nat. Prod. Microbiol.* **12**, 1547.1551 (2017).
7. Morino, C.; Morita, Y.; Minami, K.; Nishidono, Y.; Nakashima, Y.; Ozawa, R.; Takabayashi, J.; Ono, N.; Kanaya, S.; Tamura, T.; Tezuka, Y.; Tanaka, K. Oviposition inhibitor in umbelliferous medicinal plants for the common yellow swallowtail (*Papilio mchaon*). *J. Nat. Med.* **72**, 161–165 (2018).
8. Bruce, T.J.A.; Wadhams, L.J.; Woodcock, C.M. Insect host location: a volatile situation. *Trends Plant Sci.* **10**, 269–274 (2005).
9. Baur, R.; Feeny, P.; Stadler, E. Oviposition stimulants for the black swallowtail butterfly: identification of electrophysiologically active compounds in carrot volatiles. *J. Chem. Ecol.* **19**, 919–937 (1993).
10. Feeny, P.; Städler, E.; Åhman, I.; Carter, M. Effects of plant odor on oviposition by the black swallowtail butterfly, *Papilio polyxenes* (Lepidoptera: Papilionidae). *J. Insect Behav.* **2**, 803–827 (1989).
11. Inoue, T.; Suetake, M.; Nishidzu, N.; Yokohari, F.; Niihara, K.; Fukuda, K. Behavioral and electrophysiological study on eight Japanese *Papilio* species with five hostplant volatiles and linalool. *J. Chem. Ecol.* **49**, 397–407 (2023).
12. Li, Z.; Gu, H.; Song, H.; Zhou, Y.; Yang, H.; Lin, J. Radix *Angelica sinensis* soup production by decocting process using high pressure. *Int. J. Food Prop.* **20**, 620 631 (2017).
13. Hiroko, O.; Kazuaki, N.; Katsumi, U. Characterization of aroma compounds in the peel extract

- of Jabara (*Citrus jabara* Hort. ex Tanaka). *Flavour Fragr. J.* **26**, 396-402 (2011).
14. Choi, H.S.; Kim, M.S.; Sawamura, M. Constituents of the essential oil of *Cnidium officinale* Makino, a Korean medicinal plant. *Flavour Fragr. J.* **17**, 49-53 (2002).
 15. Weyerstahl, P.; Marschall, H.; Thefeld, K.; Rustaiyan, A. Constituents of the essential oil of Tanacetum (syn. *Chrysanthemum*) *fruticulosum* Ledeb. from Iran. *Flavour Fragr. J.* **14**, 112-120 (1999).
 16. Brophy, J.J.; Goldsack, R.J.; Copeland, L.M.; Jes, P.P. Essential oil of *Eryngium* L. species from New South Wales (Australia). *J. Essent. Oil Res.* **15**, 392-397 (2003).
 17. Seo, W.H.; Baek, H.H. Identification of characteristic aroma-active compounds from water dropwort (*Oenanthe javanica* DC.). *J. Agric. Food Chem.* **53**, 6766-6770 (2005).
 18. Yong, G.R.; Gebru, Y.A.; Kim, D.W.; Kim, D.H.; Han, H.A.; Kim, Y.H.; Kim, M. K. Chemical composition and antioxidant activity of steam-distilled essential oil and glycosidically bound volatiles from *Maclura tricuspidata* fruit. *Foods* **8**, 659 (2019).
 19. Xu, X.; Xu, R.; Jia, Q.; Feng, T.; Huang, Q.; Ho, C.T.; Song, S. Identification of dihydro- β -ionone as a key aroma compound in addition to C8 ketones and alcohols in *Volvariella volvacea* mushroom. *Food Chem.* **293**, 333-339 (2019).
 20. Choi, H.S. Aroma evaluation of an aquatic herb, Changpo (*Acorus calamus* var. *angustatus* Bess), by AEDA and SPME. *J. Agric. Food Chem.* **52**, 8099-8104 (2004).
 21. Miyazawa, M.; Utsumi, Y.; Kawata, J. Aroma-active compounds of *Elatostema laetevirens* and *Elatostema umbellatum* var. *majus*. *J. Oleo Sci.* **58**, 163-169 (2009).
 22. Li, T.; Zhao, M.; Yang, J.; Chuai, Q.; Raza, A.; Yang, P.; Yu, M.; Hu, D.; Zou, T.; Song, H. Characterization of key aroma-active compounds in Bobaizhi (*Angelica dahurica*) before and after boiling by sensomics approach. *J. Food Compos. Anal.* **105**, 104247 (2022).
 23. Weyerstahl, P.; Marschall, H.; Thefeld, K.; Subba, G.C. Constituents of the essential oil from the rhizomes of *Hedychium gardnerianum* Roscoe. *Flavour Fragr. J.* **13**, 377-388 (1998).
 24. Wakamura, S.; Hattori, M.; Igita, K.; Yasuda, K.; Tridjaka. Sex pheromone of *Etiella behrii*, a pod borer of soybean in Indonesia: Identification and field attraction. *Entomol. Exp. Appl.* **91**, 413-420 (1999).
 25. Charles, A.P.R.; Gu, Z.; Archer, R.; Auwarter, C.; Valenti, H.H.; Rao, J.; Chen, B. Effect of high-tunnel and open-field production on the yield, cannabinoids, and volatile profiles in industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) inflorescence. *J. Agric. Food Chem.* **72**, 12975-12987 (2024).
 26. Weyerstahl, P.; Marschall, H.; Son, P.T.; Giang, P.M. Constituents of the flower essential oil of *Aglaia odorata* Lour. from Vietnam. *Flavour Fragr. J.* **14**, 219-224 (1999).
 27. Dregus, M.; Engel, K.H. Volatile constituents of uncooked rhubarb (*Rheum rhabarbarum* L.) stalks. *J. Agric. Food Chem.* **51**, 6530-6536 (2003).
 28. Ezoe, S.; Nakano, K. and Akakabe, Y. Aroma compounds of fresh leaves and their dried powders

- in *Angelica acutiloba* Kitagawa. *J. Oleo Sci.* **74**, (9) 837–843 (2025).
29. Ali, J.; Bayram, A.; Mukarram, M.; Zhou, F.; Karim, M.F.; Hafez, M.M.A.; Mahamood, M.; Yusuf, A.A.; King, P.J.H.; Adil, M.F.; Ma, Z.; Shamsi, I.H. Peach potato aphid *Myzus persicae*: current management strategies, challenges, and proposed solutions. *Sustainability* **15**, 11150 (2023).
 30. Bass, C.; Puinean, A.M.; Zimmer, C.T.; Denholm, I.; Field, L.M.; Foster, S.P.; Gutbrod, O.; Nauen, R.; Slater, R.; Williamson, M.S. The evolution of insecticide resistance in the peach potato aphid, *Myzus persicae*. *Insect Biochem. Mol. Biol.* **51**, 41–51 (2014).
 31. Chapman, R.F.; Bernay, E.A.; Simpson, S.J. Attraction and repulsion of the aphid, *Cavariella aegopodii*, by plant odors. *J. Chem. Ecol.* **7**, 881–888 (1981).
 32. Hori, M. Onion aphid (*Neotoxoptera formosana*) attractants, in the headspace of *Allium fistulosum* and *A. tuberosum* leaves. *J. Appl. Entomol.* **131**, 8–12 (2007).
 33. Vuts, J.; Woodcock, C.M.; Caulfield, J.C.; Powers, S.J.; Pickett, J.A.; Birkett, M.A. Isolation and identification of floral attractants from a nectar plant for the dried bean beetle, *Acanthoscelides obtectus* (Coleoptera: Chrysomelidae, Bruchinae). *Pest Manag. Sci.* **74**, 2069–2075 (2018).
 34. Cao, Y.; Pistillo, O.M.; Maggi, F.; Lou, Y.; D'Isita, I.; Maggi, F.; Hu, Q.; Germinara G.S.; Lia, C. Electrophysiological and behavioural responses of *Stegobium paniceum* to volatile compounds from Chinese medicinal plant materials. *Pest Manag. Sci.* **78**, 3697–3703 (2022).
 35. Būda, V.; Radžiūtė, S.; Apšegaitė, V.; Blažytė-Čereškienė, L.; Čepulytė, R.; Bumbulytė, G.; Mozūraitis, R. Electroantennographic and behavioural responses of European cherry fruit fly, *Rhagoletis cerasi*, to the volatile organic compounds from sour cherry, *Prunus cerasus*, and fruit. *Insects* **13**, 114 (2022).
 36. Cantó-Tejero, M.; Casas, J.L.; Marcos-García, M.Á.; Pascual-Villalobos, M.J.; Florencio-Ortiz, V.; Guirao, P. Essential oils based repellents for the management of *Myzus persicae* and *Macrosiphum euphorbiae*. *J. Pest Sci.* **95**, 365–379 (2022).
 37. Shivaramu, S.; Parepally, S.K.; Byregowda, V.Y.; Damodaram, K.J.P.; Bhatnagar, A.; Naga, K.C.; Sharma, S.; Kumara, M.; Kempraj, V. Estragole, a potential attractant of the winged melon aphid *Aphis gossypii*. *Pest Manag. Sci.* **79**, 2365–2371 (2023).
 38. Ben, W. The role of olfaction in aphid host location. *Physiol. Entomol.* **37**, 10–18 (2012).
 39. Cao, Y.; Li, S.; Benelli, G.; Germinara, G.S.; Yang, J.; Yang, W.; Li, C. Olfactory responses of *Stegobium paniceum* to different Chinese medicinal plant materials and component analysis of volatiles. *J. Stored Prod. Res.* **76**, 122–128 (2018).
 40. Górski, R. Evaluation of the effectiveness of natural essential oils in the monitoring of the occurrence of greenhouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum* Westwood). *J. Plant Prot. Res.* **43**, 393–397 (2003).
 41. Hanula, J.L.; Sullivan, B. Manuka oil and phoebe oil are attractive baits for *Xyleborus glabratus*

- (Coleoptera: Scolytinae), the vector of laurel wilt. *Environ. Entomol.* **37**, 1403–1409 (2008).
42. Moon, S.R.; Cho, S.R.; Jeong, J.W.; Shin, Y.H.; Yang, J.O.; Ahn, K.S.; Yoon, C.; Kim, G.H. Attraction response of spot clothing wax cicada, *Lycorma delicatula* (Hemiptera: Fulgoridae) to spearmint oil. *Environ. Sci.* **54**, 558–567 (2011).
 43. Yoon, C.; Moon, S.R.; Jeong, J.W.; Shin, Y.H.; Cho, S.R.; Ahn, K.S.; Yang, J.O.; Kim, G.H. Repellency of lavender oil and linalool against spot clothing wax cicada, *Lycorma delicatula* (Hemiptera: Fulgoridae) and their electrophysiological responses. *J. Asia-Pac. Entomol.* **14**, 411–416 (2011).
 44. Fernández-Grandon, G.M.; Woodcock, C.M.; Poppy, G.M. Do asexual morphs of the peach-potato aphid, *Myzus persicae*, utilise the aphid sex pheromone? Behavioural and electrophysiological responses of *M. persicae* virginoparae to (4a*S*,7*S*,7a*R*)-nepetalactone and its effect on aphid performance. *Bull. Entomol. Res.* **103**, 466–472 (2013).
 45. Müller, C.B.; Williams, I.S.; Hardie, J. The role of nutrition, crowding and interspecific interactions in the development of winged aphids. *J. Ecol. Entomol.* **26**, 330–340 (2001).
 46. Rüde, D.; Ulber, B.; Cook, S.M.; Rostás, M. Attraction of cabbage stem flea beetle (*Psylliodes chrysocephala*) to host plant odors. *Pest Manag. Sci.* ps.8697 (2025).
 47. Ahmed, N.; Darshanee, H.L.C.; Khan, I.A.; Zhang, Z.-F.; Liu, T.-X. Host selection behavior of the green peach aphid, *Myzus persicae*, in Response to volatile organic compounds and nitrogen content cabbage cultivars. *Front Plant Sci.* **10**, 79 (2019).
 48. Ahmed, Q.; Agarwal, M.; Alobaidi, R.; Zhang, H.; Ren, Y. Response of aphid parasitoids to volatile organic compounds from undamaged and infested *Brassica oleracea* with *Myzus persicae*. *Molecules* **27**, 1522 (2022).
 49. Jayasinghe, W.H.; Akhter, M.S.; Nakahara, K.; Maruthi, M.N. Effect of aphid biology and morphology on plant virus transmission. *Pest Manag. Sci.* **78**, 416–427 (2021).
 50. Zhou, H.; Chen, L.; Liu, Y.; Chen, J.; Francis, F. Use of slow-release plant infochemicals to control aphids: a first investigation in a Belgian wheat field. *Sci. Rep.* **6**, 31552 (2016).
 51. Chen, R.; Zhang, K.; Xu, C.; Chen, R.; Zhu, X.; Li, D.; Gao, X.; Shi, Q.; Wang, L.; Wu, C.; Wang, L.; Luo, J.; Ji, J.; Cui, J. Identification of volatiles from preferred host plants of three winged morphs of *Aphis gossypii* and evaluation of luring-enhancing effects of volatile-based attractants. *Entomol. Gen.* **44**, 1203–1211 (2024).
 52. Zhang, Y.; Zhang, T.; Wang, X.; Bian, Z.; Zhang, X.; Yang, G.; Lu, Y. Volatiles from essential oils of three Lamiaceae plants repel the winged cotton aphid, disturb its feeding behavior and reduce its fecundity. *Pest Manag. Sci.* **80**, 4253–4263 (2024).
 53. Zhang, Y.; Wang, X.; Bian, Z.; Se, C.; Yang, G.; Lu, Y. Application of flavonoid compounds suppresses the cotton aphid, *Aphis gossypii*. *Front Plant Sci.* **16**, 1545499 (2025).

原著論文

1. 題目：Aroma Compounds of Fresh Leaves and their Dried Powders in *Angelica acutiloba* Kitagawa.

著者名：Shiro Ezoe, Katsumi Nakano, and Yoshihiko Akakabe.

学術雑誌名 巻・号・頁：Journal of Oleo Science. 74・9・837-843

出版：■ オンライン公表：□ 受理：□

発表年月又は受理年月日（発行予定年月）：2025 年 9 月

2. 題目：Analysis of the attractive effect of aroma compounds from *Angelica acutiloba* Kitagawa on the winged aphid *Aphis gossypii* Glover (Hemiptera: Aphididae).

著者名：Shiro Ezoe, Keiko Kurokawa, Toshio Tanaka, Katsumi Nakano, and Yoshihiko Akakabe.

学術雑誌名 巻・号・頁：Journal of Oleo Science. 75・4

出版：□ オンライン公表：□ 受理：■

発表年月又は受理年月日（発行予定年月）：2026 年 1 月