

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H03953

研究課題名(和文) 北海道産マルハナバチの高受粉能力系統の造成と受粉効率の評価

研究課題名(英文) Development of strain and evaluation of performance of a native bumblebee species, toward the use as a new green-house pollinator in Hokkaido

研究代表者

野村 哲郎 (Nomura, Tetsuro)

京都産業大学・生命科学部・教授

研究者番号：50189437

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,100,000円

研究成果の概要(和文)：北海道の在来種エゾオオマルハナバチの授粉系統を作出する目的で、飼育試験、コンピュータシミュレーション、トマトハウス内での授粉試験を実施した。飼育試験とシミュレーション実験の結果から、エゾの系統では30程度のコロニーサイズをコンスタントに提供することが限度であると考えられた。一方、授粉試験の結果からはエゾオオマルハナバチの授粉能力はセイヨウオオマルハナバチよりもわずかに劣るものの、実用可能な能力を有することが示唆された。エゾオオマルハナバチの実際の利用に際しては、ハウス内に設置するコロニー(巣箱)の数を増やすことで、セイヨウオオマルハナバチと遜色のない授粉効果が期待できるものと考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本では1991年からトマトのハウス栽培用のポリネーターとして、ヨーロッパ・アフリカ原産のセイヨウオオマルハナバチが導入されるようになり、ホルモン剤を用いない高品質なトマトの生産に貢献してきた。ところが、本種の導入以降、ハウスから逃げ出した個体が野外に定着する問題が発生し、現在はセイヨウオオマルハナバチの利用が制限されている。このため、それまで大規模に本種を利用してきた北海道においては、代替の受粉昆虫として在来のマルハナバチ種による授粉系統の作出に期待が高まっている。本研究の成果は、その足掛かりとなる情報を提供するものである。

研究成果の概要(英文)：In order to develop pollinator-strains of a native bumblebee species in Hokkaido, we carried out a rearing experiment, simulation experiment of selection and mating systems, and pollination experiment in green house. From the rearing experiment and computer simulation, it was shown that expected colony size of native strains would be limited to around 30 under artificial condition in laboratory. The expected colony size is below half of those obtained from foreign bumblebee species used in pollination. The pollination experiment in green house showed that although the pollination performance of the native species will be slightly inferior to that of foreign species, the native species have acceptable abilities for the practical use of pollination. It was concluded that the small colony size of the native species could be practically compensated by setting several colonies in a green house.

研究分野：動物育種学

キーワード：マルハナバチ 授粉系統 在来種 北海道 選抜育種

1. 研究開始当初の背景

マルハナバチ類は訪花性の高い昆虫で、ミツバチとは異なり花蜜を分泌しない植物の花にも盛んに訪花する特徴を持つため、ナス科作物の作付け農地をはじめ、世界中の農業の現場で受粉昆虫(ポリネーター)として用いられてきた。日本でも 1991 年からハウス栽培用農作物のポリネーターとして、ヨーロッパ・アフリカ原産のセイヨウオオマルハナバチ(*Bombus terrestris*)が導入されるようになり、その輸入量は年々増加してきた。本種は北海道を中心としたトマト栽培の施設などで広く用いられ、ホルモン剤を用いない高品質な農作物の生産に貢献してきた。ところが、本種の導入以降、一部の個体がハウスから逃げ出し、野外に定着する問題が発生した。本種は繁殖力が強く、近縁の在来マルハナバチ類や他の在来動植物で構成される生態系に影響を与えることが危惧されたため(鷲谷、1998)、2006 年には特定外来生物に指定され、現在はその利用が制限されている。このため、それまで大規模に本種を利用してきた北海道において代替の受粉昆虫に対する需要が高まっている。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえて、本研究は

- (1) 遺伝学的手法に基づく選抜育種 (BLUP 選抜) を適用し、セイヨウの代替種として利用し得る北海道在来のマルハナバチ (エゾオオマルハナバチ: *B. hypocrite sapporoensis*) を用いた高受粉能力を有する系統を作出に向けた検討を行うこと、
- (2) トマトハウス内での受粉試験により、エゾオオマルハナバチの授粉能力および効率をセイヨウオオマルハナバチと比較・評価し、栽培規模に応じた巣の数の見積もりなど実用化に向けた検討を加えることを目的として企画した。

3. 研究の方法

(1) 選抜育種による高授粉能力系統の作出の検討

北海道で春季に採集した越冬明けのエゾオオマルハナバチの女王 122 個体を京都産業大学の飼育室で飼育し、コロニーの形成、生殖虫(新女王、雄)の生産を調べて、選抜計画の規模や選抜形質に関する情報を得た。

(2) 選抜育種による系統造成のシミュレーション実験

検討した選抜計画の概要は、図 1 に示すとおりである。毎世代、雌雄各 nN 個体をペア交配してコロニーサイズ(最終的なワーカーの数)について上位 N ペアを表現型値(表現型選抜: Pheno)あるいは BLUP 法による育種価の推定値により選抜 (BLUP 選抜: BLUP) した。選抜した N 個のコロニーのそれぞれから、新女王と雄各 n 個体が生産されるものとし、それら(新女王、雄ともに nN 個体)を次世代の親としてペア交配を行った。交配はランダム交配 (RM) および女王と雄の間の共祖係数 (coancestry) の平均値が最小となる最小血縁交配 (MCM) の 2 通りを設定した。最小血縁交配におけるペアの決定は、線形計画によって行った。選抜 (Random vs BLUP) と交配 (RM vs MCM) の 4 通りの組み合わせ (scheme1-4: 表 1) についてシミュレーションを実施した。飼育実績に基づいて設定した条件の下で、12 世代まで選抜と交配を繰り返し、コロニーサイズの集団平均、近交係数の推移を比較した。シミュレーションの反復回数は、各 scheme について 100 回とした。

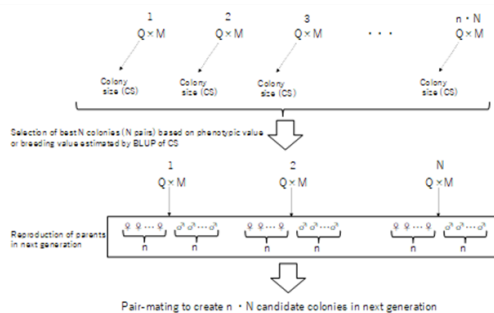


図 1 想定した選抜交配計画の概要

表 1 想定した 4 つの選抜交配計画

Scheme	Abbreviation	Selection		Mating	
		Phenotypic	BLUP	Random	MCM
1	Pheno+RM	○		○	
2	Pheno+MCM	○			○
3	BLUP+RM		○	○	
4	BLUP+MCM		○		○

(3) 系統維持のための交配様式の開発

2倍体生物において確立されている近交最大回避交配 (maximum avoidance of inbreeding : MAI) は、系統の維持において近親交配を回避する最も有効な交配様式である (Wright, 1921)。マルハナバチの授粉系統の商業的生産においても、系統維持に際して同様の交配様式を開発する必要がある。そこで、マルハナバチのような半倍数生物における MAI の開発について、理論的検討を行った。

(4) エゾオオマルハナバチとセイヨウオオマルハナバチのトマトハウス内での授粉能力の比較

両種のトマトハウス内での授粉能力を、バズポリネーション (振動採粉) 時の振動音から比較した。比較のパラメーターとしては、葯からの花粉採取量と関連する振動音の継続時間、周波数 (胸部を振動させる速度)、振幅 (胸部を振動させる力の強さ) を取り上げた。また、両種の授粉により結実したトマトについて、種子数を比較した。実験は、帯広畜産大学構内のトマトハウス内で行った。実験の概要は、図2に示すとおりである。

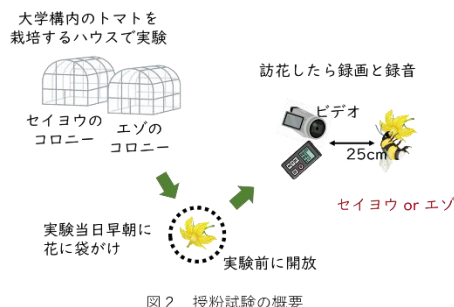


図2 授粉試験の概要

4. 研究成果

(1) 飼育営巣試験

採集した 122 個体の女王を飼育室内で飼育したところ、57 個体の女王がコロニーを形成 (少なくとも 1 個体のワーカーを生産) し、コロニーの形成率は 46.7%であった。図3にはコロニー形成に至った女王について、コロニーサイズ (総ワーカー数) の分布を示した。コロニーサイズが 5 以下の女王が 22 個体 (38.6%) を占めたが、14 個体 (24.6%) の女王からは、ハウス内での授粉に利用可能と思われる 30 以上のコロニーサイズが得られた。選抜育種によってこのレベルのコロニーサイズがコンスタントに得られれば、実用可能な系統の作出が可能と考えられた。

飼育成績に室内飼育における労力などを加味して、室内での実現可能な選抜集団の規模と選抜形質 (コロニーサイズ) のパラメーターとして、表2に示す値を設定した。

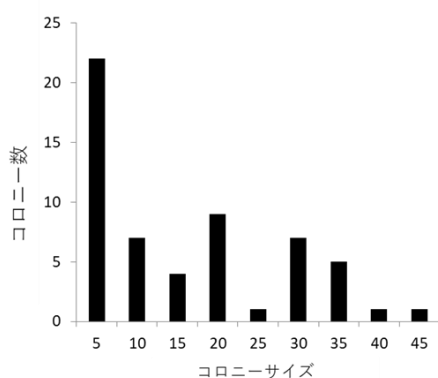


図3 コロニー数の分布

表2 シミュレーションで設定した選抜集団の規模と選抜形質のパラメーター

規模あるいはパラメーター	初期値
選抜するコロニー数 (N)	30
コロニーあたりの新女王あるいは雄数 (n)	3
選抜の候補となるコロニー数 (nN)	90
コロニーサイズの集団平均	15
コロニーサイズの遺伝率	0.3
コロニーサイズの表現型分散	150

(2) 選抜育種による系統造成のシミュレーション実験

図4(a)には、4つの選抜交配計画 (scheme1-4 : 表1) におけるコロニーサイズの集団平均の 12 世代目までの変化を示した。12 世代後には、いずれの計画でもコロニーサイズは実用利用が可能なレベル (30 以上) に達した。選抜方法については BLUP 選抜が表現型選抜よりも常に優れていたが、交配方法間では改良効果に大きな差は認められなかった。図4(b)は、4つの選抜交配計画の下での近交係数の推移を示したものである。BLUP 選抜では、同じ交配計画の下での表現型選抜よりも常に近交係数が高くなった。交配方法間で比較すると、最小の最小血縁交配 (MCM) の利用によって、ランダム交配 (RM) よりも近交係数の上昇を遅らせることができることが明らかになった。とくに、scheme4 (BLUP+MCM) は、scheme1 (pheno+RM) よりも 7 世代までは低い近交係数を与えた。

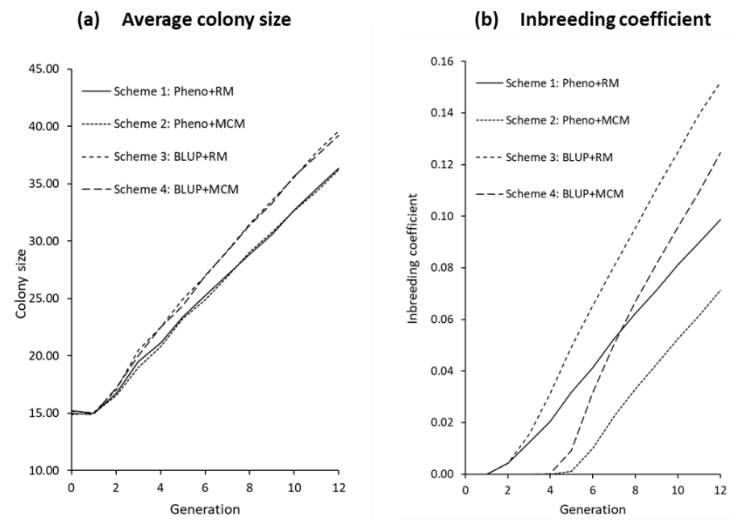


図4 4つの選抜交配計画の下での(a)コロニーサイズと(b)近交係数の変化

表3は、コロニーサイズが30以上に達するまでに要した世代数 ($G_{\geq 30}$) と、その時点での近交係数 ($F_G(\%)$) を4つの選抜交配方法間で比較したものである。系統造成の早期完了と造成された系統の近交係数の観点からは、scheme4 (BLUP+MCM) が最も妥当な選抜交配計画であると考えられた。

表3 コロニーサイズが30以上に達するまでに要した世代数 ($G_{\geq 30}$) とその時点での近交係数 ($F_G(\%)$)

Scheme	$G_{\geq 30}$	$F_G(\%)$
1: Pheno+RM	9.96	8.1
2: Pheno+MCM	10.16	5.4
3: BLUP+RM	8.85	10.8
4: BLUP+MCM	8.99	8.1

(3) 造成された系統の維持のための交配様式の開発

マルハナバチのような半倍数体生物において近交最大回避交配 (MAI) を定義するためには、コロニー数 (N) をフィボナッチ数に設定する必要があることが明らかになった。図5は、 $N=8$ としたときのMAIの1サイクルを示したものである。図中の矢印は、コロニー間での雄の移動を示す。このサイクルを繰り返すことで近交係数の上昇を最小に抑制することができるが、半倍数体生物では厳密な意味でのMAIは定義できないことが数学的に示された (Nomura, 2018)。ただし、実用的には開発した交配様式は、系統維持に際して有効であると考えられた。図6に、 $N=8$ のときの近交係数の変化をランダム交配 (Random) と循環交配 (Circular) と比較した結果を示す。

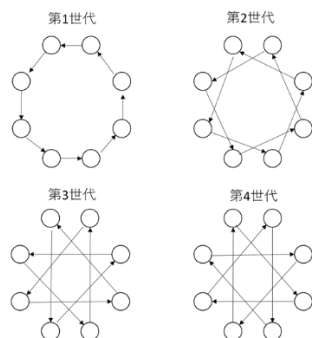


図5 コロニー数が $N=8$ のとき近交係数の上昇を最小にする交配様式。

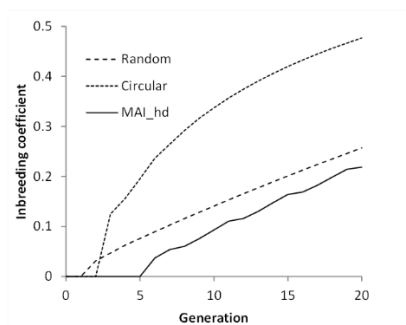


図6 コロニー数が $N=8$ のときのランダム交配 (Random)、循環交配 (Circular) および近交最大回避交配 (MAI_hd) の下での近交係数

(4) エゾオオマルハナバチとセイヨウオオマルハナバチのトマトハウス内での授粉能力の比較

花滞在時間とバズポリネーションの振動持続時間は、エゾオオマルハナバチ（以下、エゾ）のほうがセイヨウオオマルハナバチ（以下、セイヨウ）よりも長かったが（図7、8）、花滞在時間あたりで見ると振動持続時間には両種で差が見られないことが明らかになった（図8）。葯からの花粉放出量と関連がある平均振幅と最大振幅については、ともにセイヨウがエゾよりも有意に大きかった（図9）。さらに、結実したトマトの種子数もセイヨウのほうがエゾよりも有意に多かった（図10）。これは、一般にセイヨウはエゾよりも体サイズが大きいいため葯から放出された花粉をより多く体に付着できることによるものと考えられた。

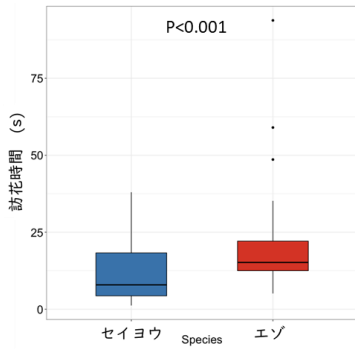


図7 花滞在時間の比較

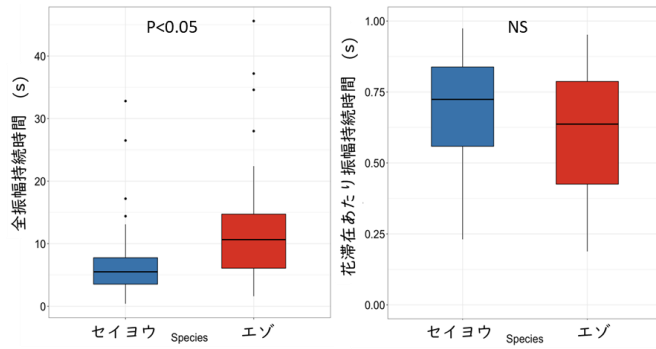


図8 振動持続時間と花滞あたりの振動時間の比較

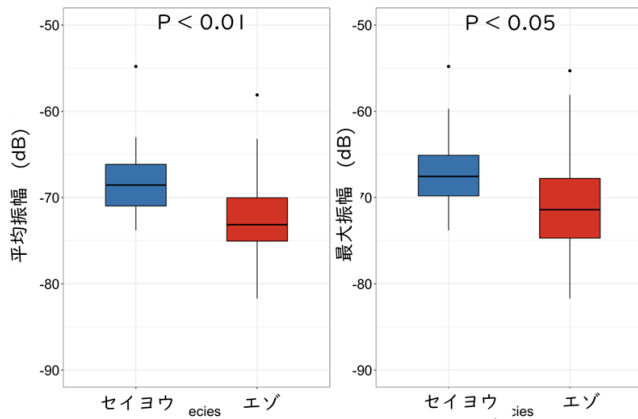


図9 平均振幅と最大振幅の比較

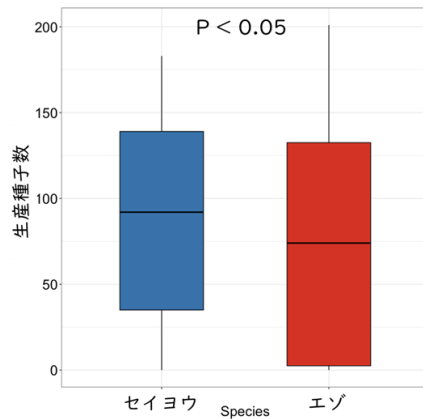


図10 1回訪花あたりの生産種子数

以上、飼育試験とシミュレーション実験の結果から、エゾの系統では30程度のコロニーサイズをコンスタントに提供することが限度であると考えられた。このコロニーサイズはセイヨウの半分以下と思われる。一方、授粉試験の結果からはエゾの授粉能力はセイヨウよりもわずかに劣るものの、実用可能な能力を有することが示唆された。実際のエゾの利用に際しては、ハウス内に設置するコロニー（巣箱）の数を増やすことで、セイヨウと遜色のない授粉効果が期待できるものと考えられた。

<引用文献>

- ① 鷲谷いづみ、保全生態学からみたセイヨウオオマルハナバチの侵入問題、日本生態学会誌、46巻、1998、73-78
- ② Wright S, Systems of mating, Genetics, 6, 1921, 111-178
- ③ Nomura T, Maximum avoidance of inbreeding in haplodiploid populations, Mathematical Biosciences, 306, 2018, 49-55

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Nomura Tetsuro, Sasaki Takuma, Taniguchi Yukio	4. 巻 25
2. 論文標題 A molecular genetic method for estimating nest density in bumblebee populations without explicit definition of habitat area	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Insect Conservation	6. 最初と最後の頁 695-706
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10841-021-00334-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 野村哲郎, 荒川愛作, 木村 澄	4. 巻 750
2. 論文標題 ハチ類の育種 - 最近の研究動向 -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 昆虫と自然	6. 最初と最後の頁 28-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 野村哲郎, 木村 澄, 荒川愛作	4. 巻 92
2. 論文標題 不完全な繁殖隔離下でのミツバチの小集団における近交度と選抜反応	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本畜産学会報	6. 最初と最後の頁 455 ~ 463
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2508/chikusan.92.455	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 藤本 恵里奈, 今野 英生, 高橋 純一	4. 巻 25
2. 論文標題 根室半島で見つかったノサップマルハナバチの成熟期の巣について	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 昆虫・ニューシリーズ	6. 最初と最後の頁 9 ~ 13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20848/kontyu.25.1_9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tetsuro Nomura	4. 巻 306
2. 論文標題 Maximum avoidance of inbreeding in haplodiploid populations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Mathematical Biosciences	6. 最初と最後の頁 49-55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mbs.2018.10.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 野村哲郎	4. 巻 39
2. 論文標題 分子遺伝マーカーからマルハナバチ集団のコロニー密度を推定するための新規な方法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 計量生物学	6. 最初と最後の頁 23-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5691/jjb.39.23	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tetsuro Nomura, Jun-ichi Takahasi	4. 巻 46
2. 論文標題 Comparison of four mating systems for maintenance of honeybee colonies in terms of the inbreeding coefficient and effective population size	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Animal Genetics	6. 最初と最後の頁 3-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5924/abgri.46.3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takeuchi T, Sasaki T, Mitsuata M, Kiyoshi T, Nishimoto M, Nomura T, Takahashi J	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Low mitochondrial DNA variation in the endangered bumblebee <i>Bombus cryptarum florilegus</i>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Apicultural Research	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 西本 愛、竹内 剛、高橋純一	4. 巻 53
2. 論文標題 オオマルハナバチの遺伝構造と系統解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 昆虫と自然	6. 最初と最後の頁 22-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nomura T., Taniguchi Y.	4. 巻 70
2. 論文標題 Simple method for combining multiple-loci marker genotypes to estimate diploid male proportion, with an application to a threatened bumble bee population in Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Insectes Sociaux	6. 最初と最後の頁 141 ~ 147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00040-022-00895-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 高橋純一
2. 発表標題 北海道在来マルハナバチ類のトマト授粉能力とミトコンドリアDNAの全長比較
3. 学会等名 関西昆虫研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅澤実鈴、浅見真莉、高橋純一
2. 発表標題 北海道・ユルリ島で発見されたシュレンクマルハナバチの遺伝的固有性
3. 学会等名 関西昆虫研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣川 諭、手塚 俊行、森 修二郎、小原 慎司、伊藤 健司、三浦 早貴、高橋 純一
2. 発表標題 紫外線カットフィルムがマルハナバチ類に及ぼす影響 . エゾオオマルハナバチとオオマルハナバチに及ぼす影響
3. 学会等名 日本応用動物昆虫学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	谷口 幸雄 (Taniguchi Yukio) (10252496)	京都大学・農学研究科・准教授 (14301)	
研究分担者	高橋 純一 (Takahashi Jun-ichi) (40530027)	京都産業大学・生命科学部・准教授 (34304)	
研究分担者	荒川 愛作 (Arakawa Aisaku) (60612728)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・畜産研究部門・主任研究員 (82111)	
研究分担者	熊野 了州 (Kumamo Norikuni) (90621053)	帯広畜産大学・畜産学部・准教授 (10105)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------