

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：82111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23780053

研究課題名(和文)ガ類害虫の音響行動と聴覚特性：超音波を使った行動制御技術の開発を目指して

研究課題名(英文)Acoustic behavior and hearing property of moth pests: implementation of behavioral regulation with artificial ultrasounds

研究代表者

中野 亮 (NAKANO, Ryo)

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構・果樹研究所 品種育成・病害虫研究領域・主任研究員

研究者番号：90546772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円、(間接経費) 540,000円

研究成果の概要(和文)：モモ、クリ果実の主要害虫であるモモノゴマダラノメイガ(以下本種)において、オスが超音波からなる短いパルスと長いパルスを交尾に用いることを明らかにした。短いパルスは、食虫性のキクガシラコウモリが捕食時に発する超音波とパルス構造が極めて似ており、交尾の競合相手となる他個体のオスの接近を阻害した。また、短いパルスは多様なチョウ目害虫(アワノメイガ、ノシメマダラメイガ等)の飛翔をも効率よく抑制した。聴神経の電気生理実験の結果とあわせ、周波数40-60 kHz、パルス長20-30 ms、パルス間隔(静音部)25-45 msの超音波が、チョウ目害虫の飛来を効果的に阻害することを突き止めた。

研究成果の概要(英文)：I demonstrated sexual acoustic communication with ultrasonic courtship songs generated by males in the yellow peach moth. Males emitted a series of short pulses and then one long pulse before a copulation attempt. Long pulse was essential for copulation because a receptive female assumed a mate acceptance posture with raised wings in response to the long pulse. On the other hand, short pulses were equivalent to echolocation pulses of attacking horseshoe bats, *Rhinolophus* spp., in pulse structure, and thus suppressed orientation flights of moths including other species (e.g., Asian corn borer, Indian meal moth). Both behavioral responses and extracellular recordings of hearing nerves revealed that ultrasounds with 40-60 kHz of frequency, 20-30 ms pulse duration and 25-45 ms inter-pulse interval repelled efficiently crambid moths (yellow peach moth, Asian corn borer etc.).

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農学・応用昆虫学

キーワード：音響交信 交尾行動 害虫防除 超音波 チョウ目 コウモリ

### 1. 研究開始当初の背景

近年の農業生産現場では、従事者の高齢化および新規参入障壁の軽減、さらには輸出促進を含めた果実商品の高付加価値化を背景に、病害虫防除作業の省力化と環境・生物多様性の保全が求められている。これを達成するには、害虫による殺虫剤抵抗性の獲得を抑止するためにも、化学合成農薬に依存しない害虫防除技術が鍵を握る。新しい物理的手法を取り入れた害虫防除として、捕食者であるコウモリが発する超音波に対する忌避反応を利用した技術体系の確立が進められている。わが国では、果樹の吸汁性ヤガ類(アケビコノハ、アカエグリバ、ヒメエグリバ等)による果樹園への飛来を防ぐ技術として、合成超音波の有用性が示されつつある。

しかしながら、蛾類害虫がどのような特性(時間構造、周波数、音圧)を持った超音波に対し、どのような聴覚特性に起因して、どのように行動することで農作物への被害を低減できるのか、という基礎的な知見の集積から応用研究への発展は十分になされていない。合成超音波を用いた行動制御技術の普及と一般化のために、蛾類害虫における超音波に対する忌避反応の原理・要因を解明する必要がある。

### 2. 研究の目的

蛾類は、食虫コウモリが発する超音波(ヒトが感知できない周波数 20 kHz 以上の音)を検出するために、1-4 個の感覚細胞からなる単純な構造の耳(鼓膜器官)を発達させている。蛾類の種内音響コミュニケーションは耳の獲得後に進化し、交尾時に配偶者が発する超音波とコウモリが捕食時に発する超音波を聞き分けていない種も知られている。このことは、捕食者の検出のために獲得した感覚受容器の生理的特性に基づき、シグナルとなる形質が受信されやすい方向に変化したことを示す。換言すれば、ある種の蛾が交尾時に超音波を発し、その超音波に忌避効果があるのであれば、蛾類害虫の飛来等を効率的に阻害できる物理的な防除資材として有効であることを意味する。

そこで、果樹(モモ、クリ)の重要害虫であるモモノゴマダラノメイガの超音波コミュニケーションに着目した。モモノゴマダラノメイガのオスは、性フェロモンを放出するメスに接近したのち、短いパルス(持続時間 25-28 ms)を連続して発し、これに続いて長いパルス(100 ms)を一つだけ発して交尾に至る。本研究では、これらのパルスの機能を行動実験により検証することをはじめに行った。次いで、種々の蛾類(特にノメイガ類)の聴覚特性を電気生理学的に解明し、蛾類害虫が検出しやすく、かつ忌避行動を誘発しやすい音響パラメータ(周波数、パルス長(パルスの持続時間)、パルス間隔(パルス間の静音部の長さ))のスクリーニングを目的として実施した。

### 3. 研究の方法

(1) モモノゴマダラノメイガのオスが交尾時に発する超音波パルスを超音波用マイクロフォンおよび高速 AD(アナログ-デジタル)/DA(デジタル-アナログ)コンバータを用いて記録するとともに、超音波スピーカにて再生し、音に対する交尾時の行動反応を解析した。

(2) モモノゴマダラノメイガ、アワノメイガ(トウモロコシ害虫)、ベニフキノメイガ(シソ害虫)、シロオビノメイガ(ホウレンソウ害虫)、ヒメトガリノメイガ(キク害虫)を対象にその聴神経を細胞外記録し、彼らが聞こえやすい音の周波数、パルス長を特定した。モモノゴマダラノメイガに関しては、聴神経が慣れにくいパルス間隔についても同様の電気生理学的手法を用いて調査した。

(3) モモノゴマダラノメイガ、アワノメイガ、ベニフキノメイガ、ノシメダラメイガ(貯穀害虫)を対象に、オスについてはメスの合成性フェロモン剤、既交尾メスについては産卵基質に対する誘引行動を室内風洞にて再現した。ここで、種々の超音波パルスを提示し、誘引行動を効率よく阻害するパルス構造を検証した。具体的には、上記蛾類と同所的に分布する食虫コウモリのモモジロコウモリ・キクガシラコウモリが捕食時に発する超音波パルス(モモジロコウモリはパルス長 5 ms、パルス間隔 11 ms; キクガシラコウモリはパルス長 30 ms、パルス間隔 30 ms)を模倣した合成超音波に加え、モモノゴマダラノメイガが発する短い超音波パルス(パルス長 28 ms、パルス間隔 26 ms)と長い超音波パルス(パルス長 339 ms、パルス間隔 26 ms)を提示してその阻害効果を試験した。

### 4. 研究成果

(1) モモノゴマダラノメイガのオスは、中胸側方にある振動膜を用いて、音圧の大きな超音波パルス(ピーク周波数 80 kHz、測定距離 1 cm における音圧 103 dB SPL (0 dB = 20  $\mu$ Pa))を発することを見出した(図 1)。オスは性フェロモンを放出するメスの近傍をホバリングしながら超音波パルスを発し、メスは持続時間が 100 ms 以上長いパルスに対して翅を背側に直立させる特異的な行動反応を示した(図 2)。オスの発音器官もしくはメスの聴覚器官(腹部にある一対の鼓膜器官)を破壊すると上記のメスの翅立て行動は引き起こされず、交尾に至ることは不可能であった。したがって、オスの発音に対するメスの翅立て行動は、交尾の受入れを表す行動と考えられた。一方、オスの発音の前半部に見られる短いパルス群(パルス長 28 ms、パルス間隔 26 ms)はメスの交尾受入れ行動と直接の関連がないものの、周囲で飛翔している他のオスの接近を阻害することが分かっ

た。これらの結果から、モモノゴマダラノメイガのオスが発する短い超音波パルスを合成・模倣することで、蛾類害虫の飛来を抑止できることが予想された。



図1 モモノゴマダラノメイガのオスが求愛時に発する超音波パルス。スケールバーは100 ms。

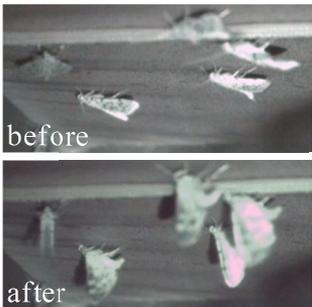


図2 モモノゴマダラノメイガのオスの超音波パルスに対して誘発するメスの交尾受入れ行動（翅立て行動）。この図では、パルス長500 ms、周波数25 kHzの超音波を提示。

(2) 各種蛾類害虫の聴神経応答を計測し、モモノゴマダラノメイガのオスが発する、忌避効果を有す短い超音波パルスを、蛾類害虫が検出しやすいことを検証した。その結果、モモノゴマダラノメイガは45 kHz以上の高周波数音に感受性が高いとともに、持続時間が13 ms以上のパルスに高い感受性を示すことが分かった(図3)。パルス長については、アワノメイガは20 ms以上、ベニフキノメイガは7 ms、シロオビノメイガは2 ms以上、ヒメトガリノメイガは4 ms以上のパルスに対する感受性が高いことを明らかにした。これらの結果から、蛾類害虫が共通して検出しやすい超音波は、周波数およそ50 kHz、持続時間が20 ms以上のパルスであることが示された。このことは、モモノゴマダラノメイガの短いパルスは、蛾類害虫各種が検出しやすいことを裏付ける。また、モモノゴマダラノメイガに関しては、パルス間間隔がおよそ30 ms以上の超音波パルスに対し、慣れを起こしにくいことも明らかにした。

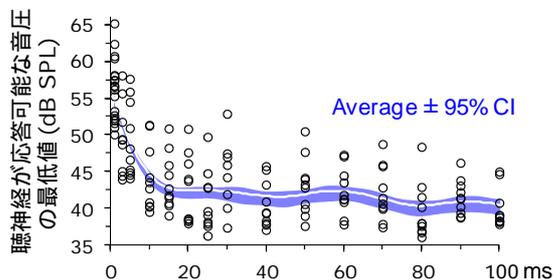


図3 モモノゴマダラノメイガの聴神経が検出しやすいパルスの長さ(ms)。持続時間が13 ms以下のパルスに対しては感受性が低い。

(3) 風洞実験において、モモノゴマダラノメイガのオスの飛来はノイズを提示しても阻害されず、83%の高い誘引率であった。一方、本種のオスが発する28 msの短いパルスに対しては誘引率が38%、339 msの長いパルスには88%、モモジロコウモリが発する5 msのパルスには63%、キクガシラコウモリが発する30 msのパルスには52%の誘引率を示した(図4)。また、同様の手法で、既交尾メスもオスの短い28 msのパルスとキクガシラコウモリの30 msのパルスに対して飛来が顕著に抑制されることを明らかにした(図5)。

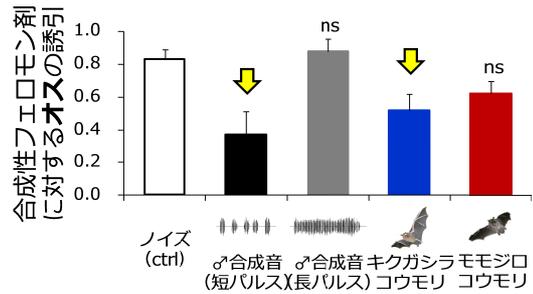


図4 モモノゴマダラノメイガのオスの飛来に対する各種超音波パルスの阻害効果。オスの発する短いパルスとキクガシラコウモリの発するパルスによる阻害効果が高い。

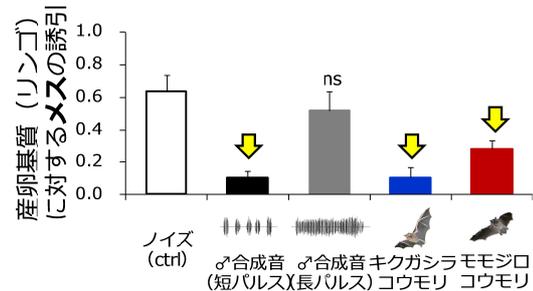


図5 モモノゴマダラノメイガの既交尾メスの飛来に対する各種超音波パルスの阻害効果。オスの発する短いパルスとキクガシラコウモリの発するパルスによる阻害効果が顕著に高い。

アワノメイガのオスもモモノゴマダラノメイガの場合と同様に、モモノゴマダラノメイガのオスの短い28 msのパルスとキクガシラコウモリの30 msのパルスに対して飛来が顕著に抑制された。

ベニフキノメイガのオスでは、上記二種の傾向に加え、モモジロコウモリの5 msのパルスに対しても飛来が抑制された。

ノシメマダラメイガでも、オス・メスともにモモノゴマダラノメイガのオスの短い28 msのパルスとキクガシラコウモリの30 msのパルスに対して飛来が顕著に抑制されることを確認した。

以上、本研究の結果から、モモノゴマダラノメイガのオスが交尾時に利用する超音波シグナルのうち、他のオスを寄せ付けな

めに発する短い超音波パルスは、キクガシラコウモリが捕食時に発する超音波パルスを模倣したものであることが示された。持続時間がおよそ 30 ms のパルスは、他の蛾種においても検出しやすく、かつ忌避行動を誘発しやすいため、蛾類害虫の飛来・侵入を阻害するのに有効なパルスであることを突き止めた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

#### [雑誌論文](計 10 件)

Ryo Nakano, Takuma Takanashi, Annemarie Surlykke, Niels Skals, Yukio Ishikawa, Evolution of deceptive and true courtship songs in moths, *Scientific Reports*, 査読有, Vol. 3, 2013, pp. 1-8, Article number 2003, DOI: 10.1038/srep02003

Ryo Nakano, Fumio Ihara, Koji Mishiro, Masatoshi Toyama, Male courtship ultrasound produced by mesothoracic tymbal organs in the yellow peach moth *Conogethes punctiferalis* (Lepidoptera: Crambidae), *Applied Entomology & Zoology*, 査読有, Vol. 47, No. 2, 2012, pp. 129-135, DOI: 10.1007/s13355-012-0099-5

Ryo Nakano, Takuma Takanashi, Fumio Ihara, Koji Mishiro, Masatoshi Toyama, Yukio Ishikawa, Ultrasonic courtship song of the yellow peach moth, *Conogethes punctiferalis* (Lepidoptera: Crambidae), *Applied Entomology & Zoology*, 査読有, Vol. 47, No. 2, 2012, pp. 87-93, DOI: 10.1007/s13355-012-0092-z

#### [学会発表](計 26 件)

Ryo Nakano, Fumio Ihara, Koji Mishiro, Satoshi Toda, Male courtship song disrupts orientation flight in the yellow peach moth, *Conogethes punctiferalis*, 14th Invertebrate Sound and Vibration International Meeting, 2013 年 7 月 23-26 日, University of Strathclyde, Glasgow, UK

Ryo Nakano, Evolution of ultrasonic courtship signals through sensory bias in moths, XXIV International Congress of Entomology, 2012 年 8 月 19-25 日, Exco, Daegu, Korea  
Ryo Nakano, Fumio Ihara, Yukio Ishikawa, Takuma Takanashi, Dual roles of male courtship ultrasound in the yellow peach moth, Invertebrate Sound and Vibration 13th International Meeting,

2011 年 6 月 4-7 日, University of Missouri, Missouri, US

#### [図書](計 2 件)

高梨 琢磨、中野 亮 (分担執筆)、シーエムシー出版、ガ類の多様な超音波発音機構とその機能、in 次世代バイオミメティクス研究の最前線 生物多様性に学ぶ、2011, pp. 133-137

中野 亮 (分担執筆)、北隆館、ガ類における交尾と防衛のための発音、in 環境 Eco 選書 5 「昆虫の発音によるコミュニケーション」、2011, pp. 87-103

#### [産業財産権]

出願状況 (計 2 件)

名称: チョウ目害虫の飛来を合成超音波で抑止する方法

発明者: 中野 亮

権利者: 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構

種類: 特許

番号: 特願 2013-251035

取得年月日: 2013 年 12 月 4 日

国内外の別: 国内

名称: チョウ目害虫の飛来を合成超音波で抑止する方法

発明者: 中野 亮

権利者: 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構

種類: 特許

番号: 特願 2013-000110

出願年月日: 2013 年 1 月 4 日

国内外の別: 国内

#### [その他]

報道関連等 (計 7 件)

<http://www.sciencedaily.com/releases/2013/07/130708114944.htm>

<http://ultrafutureworld.com/varied-and-unexpected-ultrasonic-courtship.html>

<http://www.asianscientist.com/in-the-lab/moths-anti-bat-defense-mating-2013/>

[http://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2013-07/uosd-rut070813.php](http://www.eurekalert.org/pub_releases/2013-07/uosd-rut070813.php)

<http://www.the-scientist.com/?articles.view/articleNo/36103/title/Moth-Mating-Calls-Linked-to-Bats/>

<http://www.natureasia.com//ja-jp/research/highlight/8527>

<http://www.a.u-tokyo.ac.jp/topics/2013/20130628-1.html>

ホームページ等

<http://scholar.google.com/citations?hl=en&user=TStE1p0AAAAJ>

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

中野 亮 (NAKANO, Ryo)

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究  
機構・果樹研究所・品種育成・病害虫研究  
領域・主任研究員

研究者番号：9 0 5 4 6 7 7 2