

令和 6 年 5 月 16 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K06318

研究課題名(和文) 昆虫の翅干渉色のスペクトローム解析

研究課題名(英文) Spectrome analysis of wing interference patterns of insects

研究代表者

高橋 一男 (Takahashi, Kazuo)

神奈川大学・理学部・教授

研究者番号：10450199

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：小さな昆虫の透明な翅で発色する構造色であるWIPsの定量化法を確立し、微小昆虫のWIPsの変異とその生態学的意義を解明することを目的として研究を行った。令和3年度には、12種のショウジョウバエのWIPsの定量評価や、幼虫の発育環境条件が成虫のWIPsに与える影響を評価した。令和4年度には、ショウジョウバエを用いた研究を継続しつつ、訪花性昆虫のWIPsの定量評価を行った。令和5年度には、近縁な4種のショウジョウバエとそのF1雑種のWIPsを評価し、遺伝形式の違いを明らかにした。さらに、可視光-UV撮影システムを構築し、昆虫や鳥類の視覚を用いてWIPsを評価する方法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で確立した、ハイパースペクトル画像解析による昆虫のWIPs解析の試みは世界初である。本研究をベースとして、幅広い昆虫群において、人間の知覚の限界を超えたWIPsのスペクトローム解析が可能となる事が期待できる。また、WIPsに基づいた性判定や種判別が可能となったことに加えて、WIPsが幼虫期の発育環境を反映する可能性も示唆されたため、成虫のWIPsの解析により、幼虫期の発育環境の推定も可能となるかも知れない。さらに、本研究の成果は、WIPsの進化や発生・遺伝基盤の解明にもつながる可能性があり、様々な研究分野に波及効果を及ぼす事が期待される。

研究成果の概要(英文)：I conducted research aimed at establishing a quantification method for Wing Interference Patterns (WIPs), structural colors observed in the transparent wings of small insects, to elucidate the variations in WIPs among small insects and their ecological significance. In fiscal year 2021, I quantitatively evaluated the WIPs of 12 species of *Drosophila* and assessed the impact of larval developmental conditions on adult WIPs. Continuing our work with *Drosophila* in fiscal year 2022, I also conducted quantitative evaluations of the WIPs of flower-visiting insects. In fiscal year 2023, I evaluated the WIPs of four closely related species of *Drosophila* and their F1 hybrids, revealing differences in genetic patterns. Additionally, I developed a visible light-UV imaging system and established a method to evaluate WIPs using the insect and avian visions.

研究分野：昆虫生態学

キーワード：翅干渉色

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

小さな昆虫の持つ、透明で薄い翅は、暗い背景で観察すると非常に鮮やかな薄膜干渉による構造色を発色する事が知られており 1、WIPs (Wing Interference Patterns) と呼ばれている (図 1)。2011 年に幅広い昆虫での発色が初めて報告され、それまで見落とされてきた重要な表現型である可能性が示唆されてきた。実際に、自然環境下においても、透過光の少ない植生下などの環境においては鮮明な発色が見られるため、昆虫が WIPs を配偶者選択などのコミュニケーションに用いている可能性も示唆されている。ハエ目やハチ目を含む幅広い分類群の昆虫で観察される WIPs は、種内で非常に安定した形質で、外部形態に種間差が乏しい微小昆虫において、分類形質としても注目されている。しかし、未だに定量化法が確立されておらず、人間の視覚に基づいた可視表現型としてのみ活用されている。WIPs は、背側、腹側の 2 枚のシートからなる、昆虫の翅の微細な物理構造を反映する構造色のため、膨大な翅形態形成過程の変異の情報を保持する可能性がある。そのため、雌雄間、種間、発育環境間などで WIPs に量的な違いが生じる可能性が高い。しかし、このような WIPs 変異は、必ずしも人間の視覚で認識できるとは限らず、知覚の限界を超えた情報を活用する必要がある。WIPs の定量化法を確立し、その性差や種間差を記述する事によって、これまで未知であった微小昆虫における WIPs の変異やその生態学的意義を明らかにすることが可能となる。



図1. 明るい背景 (左) と暗い背景 (右) における WIPs の発色の違い。写真中で白く光っている部分に青色から赤色までの鮮やかな発色が見られる。

### 2. 研究の目的

これまでの WIPs の評価では、赤、緑および青色の 3 つの波長帯の輝度情報を持つ RGB 画像が用いられてきたが、WIPs の光学反射スペクトルのごく一部の情報しか活用できておらず、多大な情報損失を伴っている。一方で、数十から数百種類に分光された波長の輝度情報を持つハイパースペクトル画像は、幅広い波長域の輝度情報を精密に記録できることに大きな利点がある。ハイパースペクトル画像を活用する事で、より詳細な WIPs の解析が可能となり、WIPs の性差、種間差、発育環境による差異などを定量的に解析できるようになる可能性がある。本研究では、このハイパースペクトル画像解析を WIPs の解析に適用する事で、WIPs の分光特性の総体としてのスペクトロームの解析法を開発する事を目的とした。

WIPs は幅広い昆虫において発色が確認されており、その中には送粉者や害虫として、応用的重要性の高い昆虫も多数含まれている一方で、その定量化法が未開発であるため、応用昆虫学的、生態学的重要性の理解が進んでいない。ハイパースペクトル画像解析による昆虫の WIPs 解析の試みは世界初であり、新たなハイパースペクトル画像撮影システムの構築、撮影条件の最適化、そして、スペクトルデータ解析法の開発が必要となるため、学術的独自性と創造性を有しているといえる。ショウジョウバエ科昆虫をモデル系にして、ハイパースペクトル画像を活用した WIPs のスペクトローム解析法を確立する事が出来れば、幅広い昆虫群において、人間の知覚の限界を超えた WIPs のスペクトローム解析が可能となる事が期待できる。

### 3. 研究の方法

#### (1) WIPs の種間差と性差の検証、雑種と親種の比較による WIPs の遺伝様式の検証

ショウジョウバエは厳密に制御された環境下での飼育が可能であり、性差、種間差、発育環境による差異などの評価システム構築のモデル系として最適である。ショウジョウバエ科の昆虫 12 種を研究材料として用い、ハイパースペクトルカメラ画像撮影システム(図2)を用いて、ショウジョウバエの WIPs の撮影を行った。また、その際に、翅脈で囲まれた 6 つの翅の区画(図3)ごとに平均スペクトルを算出し、スペクトローム解析に用いた。また、同様の方法で、4 種の近縁なショウジョウバエ(*Drosophila melanogaster*, *Drosophila simulans*, *Drosophila sechellia*, *Drosophila mauritiana*) とその F1 雑種の WIPs を評価し、WIPs の遺伝様式の評価を行った。



図2. ハイパースペクトル画像撮影システム。

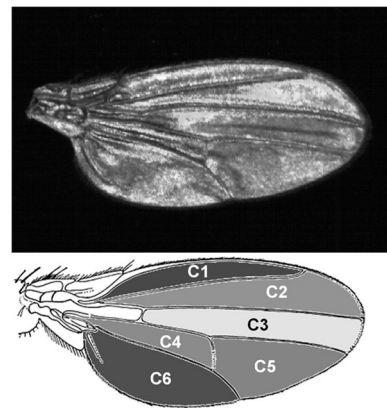


図3. 翅のRGB合成画像(上)と6つの区画(下)。

#### (2) 訪花性昆虫における WIPs の変異

ショウジョウバエで確立した手法をベースとして、可視光だけでなく UV まで含めた撮影システムの構築を行うために、ツツジを利用する訪花性昆虫(ハチ目とハエ目)を対象として WIPs を評価した。ここでは、UV カメラ(GO-8105M-5GE-UV)と紫外光 LED・可視光 LED 照明を用いた。また、350 nm, 440 nm, 520 nm, 595 nm を透過するフィルターを使用して撮影を行い、アオガラとミツバチの色覚を再現した。

#### (3) 幼虫期の発育環境が成虫の WIPs に与える影響

一般的に、昆虫の形態形成には幼虫期の栄養条件(餌のカロリーやタンパク質:炭水化物比)や温度条件が影響する事が知られており、これらの環境条件が翅の形態形成を通して WIPs にも影響する可能性がある。また、少なくともショウジョウバエにおいては、WIPs が配偶者選択に重要な役割を果たしている可能性が示唆されており、好適な環境で育った適応度の高い個体と劣悪な環境で育った低い個体で WIPs が異なっている可能性もある。本研究では、キロショウジョウバエを研究材料として、幼虫期の栄養条件として、カロリー濃度(500~1500 kcal/L)とタンパク質:炭水化物比(1:2~1:12)を設定し、それらを組み合わせた餌条件で飼育を行った。羽化成虫をサンプリングし、上述の手法で WIPs の評価を行った。

### 4. 研究成果

### (1) WIPs の種間差と性差の検証、雑種と親種の比較による WIPs の遺伝様式の検証

近縁種間において、WIPs は有意な種間差を示した。また、翅の区画ごとに、性差の有無が異なり、種ごとにそのパターンが様々であることが示された(表 1)。また、機械学習モデルを用いた解析により、WIPs のみの情報を用いて、少なくとも 80%以上の確率で、種判別を行うことが可能であることも示された。この研究成果により、本申請で提案したスペクトローム解析法の有用性が確認できた。研究の成果は、Physiological Entomology 誌に掲載された。

表 1. 翅の各区画(C1~C6)における性差の有意性

Species	C1	C2	C3	C4	C5	C6
<i>D. aruraria</i>	sig	sig	sig	sig	non-sig	non-sig
<i>D. simulans</i>	sig	sig	sig	sig	non-sig	non-sig
<i>D. mauritiana</i>	sig	sig	sig	sig	sig	sig
<i>D. sechellia</i>	sig	sig	sig	non-sig	sig	non-sig
<i>D. melanogaster</i>	sig	sig	non-sig	non-sig	sig	non-sig
<i>D. takahashii</i>	sig	sig	sig	sig	non-sig	non-sig
<i>D. lutescens</i>	sig	sig	sig	sig	sig	sig
<i>D. suzukii</i>	sig	sig	sig	sig	non-sig	non-sig
<i>D. albomicans</i>	sig	sig	sig	sig	sig	sig
<i>D. immigrans</i>	sig	sig	sig	sig	sig	sig
<i>D. hydei</i>	sig	sig	sig	sig	non-sig	non-sig
<i>D. virilis</i>	sig	sig	non-sig	non-sig	non-sig	sig

\* sig: 5%水準で有意、non-sig: 5%水準で有意ではない

#### 近縁な 4 種のショウジョウバエとそ

の F1 雑種の WIPs を評価した研究の結果、4 種間で WIPs に明瞭な分化が見られ、F1 雑種の WIPs は、親種の組み合わせによって、どちらかの親種の WIPs が優性効果を示す場合と、相加的効果を示す場合がある事が示された。また、翅脈によって区切られた区画により、WIPs の遺伝形式が異なるケースがあったことから、翅の区画によって独立な遺伝基盤が存在する可能性が示唆された。この研究成果により、WIPs の遺伝様式と、その発生遺伝学的制御についての知見が得られた。研究成果は論文として現在投稿中である。

### (2) 訪花性昆虫における WIPs の変異

令和 4 年から 5 年にかけて、訪花性昆虫の採集を行い、合計約 800 個体の訪花性昆虫を採集した。令和 5 年度には、可視光に加えて UV を活用した撮影システムを検討し、その構築に成功した。この撮影システムを用いて訪花性昆虫の翅の撮影を行ったところ、WIPs を含む背景依存的な翅色変異の存在が検出された。この研究により、昆虫や鳥類の視覚においても、WIPs に種間変異が存在することが示された。データの追加と解析方法の更なる改善を行った上での学術論文の作成を目指している。

### (3) 幼虫期の発育環境が成虫の WIPs に与える影響

幼虫の栄養条件、温度条件のいずれもが有意に WIPs に影響することが示された。また、適応度の高くなるような環境条件と適応度の低くなるような環境条件において、WIPs が有意に異なることが示されたため、配偶者選択においても WIPs の色情報が活用されている可能性が示唆された。研究結果を論文の形にまとめて、投稿予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kazuo H. Takahashi	4. 巻 online first
2. 論文標題 Quantitative analysis of wing interference patterns in Drosophila spp. using hyperspectral images	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physiological Entomology	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/phen.12405	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 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------