



Behavioral studies on spatial recognition based on polarization vision in the cricket *Gryllus bimaculatus*

松原, 伸明

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2024-03-25

(Date of Publication)

2027-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8857号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100490082>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 松原 伸明
専 攻 理学研究科 生物学専攻

論文題目

Behavioral studies on spatial recognition based on polarization vision in
the cricket *Gryllus bimaculatus*

(フタホシコオロギの偏光視に基づく空間認識に関する行動学的研究)

指導教員 佐倉 緑

動物は、繁殖や採餌などのために移動する必要がある。多くの動物は周囲の様々な情報から空間を認識し、経験とともに最適なナビゲーションを行うようになる。ナビゲーションに必要な周囲の情報の中で特に重要なものが方向情報である。近年、方向情報の脳内表現に関する研究が進み、自身の頭部方向を符号化するニューロンが同定された。類似のニューロンが哺乳類、鳥類、昆虫の広い動物種にあることから、動物の方向情報処理において共通のメカニズムが示唆されている。昆虫は、比較的単純な神経ネットワークを持つ一方で、非常に優れたナビゲーション行動を示すことから、ナビゲーションの神経基盤を解明するための研究対象として有用である。そこで私は本研究において、昆虫の主要な方向情報源の一つである偏光に着目し、偏光を用いた移動方向の決定メカニズムに関する研究を行った。偏光は電場ベクトル（e-ベクトル）の振動方向が偏った光で、大気中の粒子によって散乱した太陽光に含まれる。この時、偏光のe-ベクトル方向は太陽の位置依存的に決定されるため、天空の偏光パターンは太陽と同じようなコンパス情報として、多くの昆虫が利用している（偏光コンパス）。昆虫においては偏光受容に特化した個眼やその形態、偏光情報の脳内経路など、偏光の情報処理に関する生理学的な研究が進んでいる。その一方で、偏光を利用した行動、特に経験に基づく方向決定に関する研究は少なく、偏光コンパスの神経基盤を明らかにする際の障害となっている。本研究では、偏光視に関する神経生理学および行動学的研究が比較的進んでいるフタホシコオロギを実験材料とし、偏光視に基づいた空間認識と経験による行動変化を評価した。

Chapter 1では、本博士論文の研究背景の詳細と動物の偏光利用について述べ、動物のナビゲーションにおける本研究の位置づけを示した。

Chapter 2では、円形アリーナ内での偏光に基づく空間認識能力について述べた。アリーナ床面を熱することで逃避をモチベーションとした探索行動を行わせ、床の一部を低温にした領域（ゴール）までの移動を記録した。アリーナの天井に直線偏光板を組み合わせることで人工的な偏光パターンを作成し、コオロギに提示した。偏光パターンとゴールとの位置関係を固定した偏光が利用できる群と、位置関係が試行ごとにランダムに変化する偏光が利用できない群とで探索訓練を繰り返し行った。ゴール到達までの到達時間と歩行距離を計測したところ、偏光情報が利用できる群でのみ到達時間、歩行距離ともに顕著に減少した。また、偏光が利用できる群のコオロギは、訓練後、アリーナ中央部の探索時間が減少した。以上の結果は、コオロギが偏光視に基づいて空間を認識することを示唆している。

Chapter 3では、空気圧で浮かせたスチロール球（トレッドミル）を用いた無限空間内で、移動方向の決定における偏光の利用について述べた。トレッドミル上を歩行しているコオロギに一定の周期でe-ベクトルが回転する偏光刺激を与えると、進行方向が刺激の回

転に同調して変化する偏光定位行動を示した。またこの時、コオロギは個体ごとにランダムな e-ベクトル方向に定位するが、特定の e-ベクトルの範囲でコオロギの腹部に赤外光レーザーで罰刺激を与える条件付けを行うと、罰の e-ベクトルの範囲を避けるようになった。このことから、コオロギが e-ベクトルの方向と罰を連合して学習する能力を持つことが明らかとなった。以上の結果は、コオロギが進行方向を e ベクトルによって記憶し、移動方向を決定することを示している。

Chapter 4 では、本研究で行った 2 種類の行動実験の結果と先行研究の知見に基づく考察を述べた。本研究において、コオロギの探索パターンの変化や進路方向の決定が、過去の偏光刺激の経験に基づくことが示された。このような行動変化はこれまで、主に社会性昆虫で報告されていたが、今回コオロギのような決まった巣を持たない昆虫でも同様な現象が見られたことは、従来考えられていたよりも幅広い昆虫種において、偏光視に基づく可塑的な行動変容が起こることを示唆している。昆虫のナビゲーション行動においては、脳の最高次中枢の一つである中心複合体が、偏光や頭部方向などから得られた現在の方向と、自らの目標地点の方向を比較し、ステアリング司令を出力する領域だと考えられている。しかしながら、その詳細な神経機構は未解明である。コオロギは中心複合体に存在する偏光感受性ニューロンが既に同定されており、本研究において偏光に対する柔軟な行動変容が確認できたことから、今後のナビゲーションの神経行動学的研究における有用なモデル動物になるといえる。また、Chapter 3 のトレッドミル装置は電気生理学的な実験との組合せが可能である。これにより学習中の中心複合体ニューロンの応答特性の時間的変化を追跡することができれば、昆虫及び広く動物一般の方向情報処理メカニズムの共通原理の解明に繋がると期待される。

氏名	松原 伸明		
論文 題目	Behavioral studies on spatial recognition based on polarization vision in the cricket <i>Gryllus bimaculatus</i> (フタホシコオロギの偏光視に基づく空間認識に関する行動学的研究)		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	准教授	佐倉 緑
	副 査	教授	青沼 仁志
	副 査	教授	奥田 昇
	副 査		印
	副 査		印
要 旨			
動物は、繁殖や採餌などのために移動する必要がある。多くの動物は周囲の様々な情報から空間を認識し、経験とともに最適なナビゲーションを行うようになる。ナビゲーションに必要な情報の中で特に重要なものが方向である。近年、方向情報の脳内表現に関する研究が大きく進み、多くの動物種でナビゲーション中に自身の頭部方向をモニタリングするニューロンが同定されている。類似の機能を持つニューロンが哺乳類、鳥類、昆虫などの幅広い動物種で普遍的に見られることから、動物の方向情報処理において共通のメカニズムが存在すると考えられている。昆虫は、比較的単純な神経ネットワークしか持たないにも関わらず非常に優れたナビゲーション行動を示すことから、ナビゲーションの神経基盤を解明するための研究対象として有用である。そこで本学位論文において松原氏は、昆虫の主要な方向情報源の一つである偏光に着目し、偏光を用いた移動方向の決定メカニズムに関する研究を行い、その結果について報告、考察している。偏光とは電場ベクトル (e-ベクトル) の振動方向が偏った光のことであり、大気中の粒子によって散乱した太陽光に含まれている。この偏光の e-ベクトル方向は太陽の位置依存的に決まるため、天空の偏光パターンは太陽と同じようなコンパス情報として、多くの昆虫が利用している (偏光コンパス)。昆虫の偏光情報処理に関してはこれまで、複眼に偏光受容に特化した個眼領域が存在することやその個眼の形態、偏光の脳内情報処理経路など、豊富な神経生理学的知見が蓄積されている。その一方で、偏光を利用した方向決定と経験による学習効果に関する行動学的知見は少なく、これが偏光コンパスの神経基盤を明らかにする際の障害となっている。そこで本研究において松原氏は、偏光視に関する神経生理学的および行動学的研究が比較的進んでいるフタホシコオロギを研究対象とし、偏光視に基づいた空間認識能力および空間学習能力を評価した。 Chapter 1 では、本博士論文の研究背景の詳細と動物の偏光利用について述べ、動物のナビゲーション研究における本研究の位置づけが示された。 Chapter 2 では、円形アリーナ内での偏光に基づく空間認識能力について調べるため、アリーナ床面を熱し、床の一部を低温にした領域 (ゴール) を探索させる実験を行った結果について報告されている。アリーナの天井に直線偏光板を組み合わせて人工的な偏光パターンを作成し、コオロギに提示した。偏光パターンとゴールとの位置関係を固定した偏光が利用できる条件と、位置関係が試行ごとにランダムに変化する偏光が利用できない条件で探索訓練を繰り返し行った。ゴール到達までの到達時間と歩行距離を計測したところ、偏光情報が利用できる群でのみ到達時間、歩行距離ともに顕著に減少した。また、偏光が利用できる条件で訓練すると、アリーナ中央部の探索時間が減少した。これは、偏光が利用できない場合にはアリーナ全体を効率良く探索するのに対し、利用できる場合にはゴールの位置が把握でき、接触走性が強く発現することを示唆している。これらの結果は、コオロギの偏光視に基づく空間認識を示している。 Chapter 3 では、トレッドミルを用いた無限空間内で、移動方向の決定における偏光の利用について調べた結果について報告されている。トレッドミル上を歩行しているコオロギに一定の周期で e-ベクトルが回転する偏光刺激を与えると、進行方向が刺激の回転に同調して変化する偏光定位行動を示した。またこの時、コオロギは個体ごとにランダムな e-ベクトル方向に定位するが、特定の e-ベクトルの範囲でコオロギの腹部に赤外光レーザーで罰刺激を与える条件付けを行うと、罰の e-ベクトルの範囲を避けるようになった。このことから、コオロギが e-ベクトルの方向と罰を連合して学習する能力を持つことが明らかとなった。以上の結果は、コオロギが方向を天空の偏光の e-ベクトルによって識別・記憶し、その記憶に基づいて自身の移動方向を決定することを示している。			

氏名	松原 伸明
----	-------

Chapter 4 では、Chapter 2 および Chapter 3 で報告された 2 種類の行動実験の結果について、先行研究の知見をふまえた考察が述べられている。本研究において、コオロギの探索パターンや進路方向の決定が、過去の偏光刺激とともに生じたイベントによって大きく変容することが示された。このような経験による偏光刺激に対する行動の変化はこれまで、主に社会性昆虫の採餌行動が示す採餌行動を対象に研究されてきており、本学位論文は、コオロギのような非定住性の昆虫における初めての詳細な報告となる。またこの結果により、従来考えられていたよりも幅広い昆虫種において、偏光視に基づく可塑的な行動変容が起こることが示唆されたことになる。昆虫のナビゲーション行動では、脳の最高次中枢の一つである中心複合体において、偏光や頭部方向などから得られた現在の方向と、自らの目標地点の方向との比較がなされ、それに基づいて最終的なステアリング司令が前運動中枢に出力されと考えられている。しかし、その詳細な神経機構は明らかにされていない。コオロギは中心複合体に存在する偏光感受性ニューロンが既に同定されており、本研究によって示された偏光に対する柔軟な行動変容を鑑みると、今後のナビゲーションの神経行動学的研究において有用なモデル動物になり得ることが示唆される。また、Chapter 3 で報告されたトレッドミル装置は、行動解析への利用だけではなく、電気生理学的な実験との組合せることが可能である。これにより学習行動中の中心複合体ニューロンの応答特性の時間的变化を追跡することができれば、昆虫及び広く動物一般の方向情報処理メカニズムの共通原理の解明に繋がることが期待できる。

以上のように、本研究は昆虫の偏光視に基づく方向検出について、事前の経験による行動の柔軟性とその意義を研究したものであり、コオロギのような非定住性の昆虫における偏光視による空間認識とその学習による変容について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の松原 伸明氏は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。