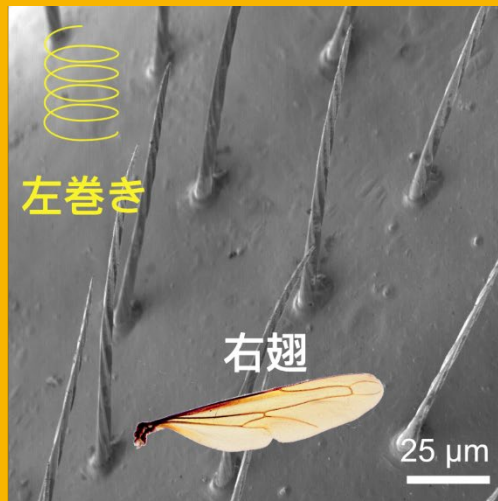
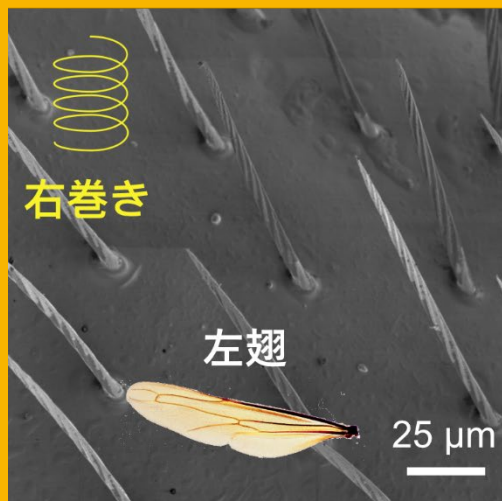


令和7年6月25日
愛媛大学

昆虫の左右の羽の超微細構造はそれぞれ右巻きと左巻き

～生物界に存在する左と右の起源の理解につながる成果～



走査電子顕微鏡で観察された、モンズズメバチの左翅（羽）と右翅で観察された棘状の毛。左翅の毛には右巻き、右翅の毛には左巻きの構造がみられる。

愛媛大学先端研究院地球深部ダイナミクス研究センター（GRC）の井上紗綾子助教、愛媛大学理学部佐藤久子研究員、東邦大学医学部山岸皓彦博士からなる研究チームは、モンズズメバチ後翅（羽）の高分解能走査電子顕微鏡法観察を行いました。

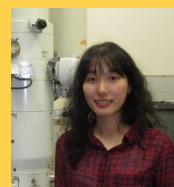
その結果、翅の表面は微小な棘状の毛で覆われ、その毛には螺旋状の溝があることが観察されました。その螺旋の溝は、左翅は右巻き、右翅は左巻きと左右で異なっていることも分かりました。さらに、顕微スキャン型多次元赤外円二色性分光装置を用いた解析で、この左右非対称構造の成因は棘を構成するタンパク質の構造と強く関係していることを示しました。

生物の左右非対称性はその生物が発揮する機能とも関連しており、今回の成果は非対称性の起源をより明確にするものです。

本研究成果は、英国王立化学会の科学雑誌「Physical Chemistry Chemical Physics」に6月13日に掲載されました。

【本件に関する問い合わせ先】

愛媛大学 先端研究院 地球深部ダイナミクス研究センター 助教 井上 紗綾子
電話：089-927-8611 E-mail: inoue.sayako.nr@ehime-u.ac.jp



昆虫翅（羽）微細構造の左右の違いはタンパク質の高次構造によって制御される ～生物界の左と右の起源の理解につながる成果～

愛媛大学

【研究成果のポイント】

- 人間の左手と右手の関係のように、鏡に映ると同じ形だが、そのままでは重ならない性質をキラリティと呼ぶ。生物の体は左右非対称な形を持つことが知られている。
- 本研究はモンスズメバチの左右後翅の微細構造を観察し、マイクロメートルスケールで左右非対称にあることを発見した。
- 翅微細組織の左右非対称性はタンパク質高次構造により制御されていることが示唆された。
- 高い空間分解能での微細組織観察とタンパク質の局所高次構造検出により、昆虫翅の左右非対称性と分子レベルのキラリティの関係、つまり翅の構造という器官レベルでのマクロな非対称性が分子レベルでのミクロな非対称性に成因を持っていることを明確に示した。

【概要】

愛媛大学先端研究院地球深部ダイナミクス研究センターの井上紗綾子助教、愛媛大学理学部佐藤久子研究員（元理工学研究科 教授）、東邦大学医学部山岸皓彦博士（元東京大学大学院理学系研究科 教授）の研究チームは、昆虫翅の微細構造の左右非対称性が、それを構成するタンパク質高次構造により制御されることを明らかにしました。

昆虫は左右で対になった翅をもち、その微細構造は昆虫翅の多機能性と関係して調べられてきました。しかし、左翅と右翅の微細構造の比較はあまりされてきませんでした。なぜなら、翅の微細構造はマイクロメートル（1 mm の千分の一）スケールであり、高い空間分解能での解析が必要となるためです。本研究チームではモンスズメバチの左右後翅の微細構造を高い空間分解能をもつ電界放出型走査電子顕微鏡により観察し、翅表面を覆う長さ 100 μm （マイクロメートル）直径 6 μm の棘状の毛の表面に螺旋状の溝があることを明らかにしました。螺旋状の溝には左巻きと右巻きがあり、後翅の前縁部分では左翅では右巻き、右翅では左巻きの螺旋模様が卓越していることが明らかになりました。棘を構成するタンパク質の高次構造を、研究チームメンバーが開発した 100 μm の空間分解能を持つ顕微スキャン型多次元赤外円二色性分光装置にて解析したところ、左翅と右翅の棘はそれぞれ右手型と左手型のタンパク質高次構造をもつことが示されました。本研究の結果は昆虫の左右非対称性の形成がタンパク質高次構造により制御されていることを示唆しています。本研究で行ったような高空間分解能での昆虫翅の左右非対称性の解析はこれまで行われてきませんでした。本研究の結果は、他の昆虫翅においても同様の

関係が発見される可能性を示すもので、今後の検証により生物の形態の左右非対称性がどのように作られるのかが明らかになると期待されます。本研究成果は英国王立化学会の科学雑誌「Physical Chemistry Chemical Physics (PCCP)」に 6 月 13 日に掲載されました。

【詳細】

人間の左手と右手は、左手を鏡に映すと右手と同じ形にみえますが、手のひらを上にした状態で左右の手が重なり合うことはありません。このように鏡に映すと同じ形態ですが、そのままでは重ならない性質をキラリティと呼びます。生物の体を構成する分子の多くはキラリティをもちますが、「左手型」または「右手型」のどちらかで構成されていることが多いことが知られています。例えばタンパク質を構成するアミノ酸は左手型、DNA は右手型の糖により構成されています。しかし、左右の手や内臓の形や配置など、生物の体は左右非対称な形を持つことが知られており、「左または右のどちらか片方だけのキラルの分子から、なぜ左右非対称な形がつけられるのか？」という問いに私たちは未だ明確に答えることはできません。昆虫の左右の翅の関係も左右非対称性の一例です。昆虫の左右の翅関係が、昆虫が飛んだり、空中で停止したりする特徴的な機能を可能にしていることがよく知られています。

昆虫翅の表面にはキチン（カニやエビの殻の物質）とタンパク質で構成される微細構造が存在し、微細構造と翅の機能性に関する関係については活発に調べられてきました。しかし、微細構造の左右の関係にはほとんど着目されていませんでした。その原因の一つに、マイクロメートルスケール（※1）の微細構造とそれを構成する局所的なキラリティを解析するためには、高い空間分解能（※2）での解析が必要なことがあります。

愛媛大学先端研究院地球深部ダイナミクス研究センターの井上紗綾子助教らの本研究チームでは、高い空間分解能をもつ電界放出型走査電子顕微鏡（※3）による微細組織観察と、研究チームメンバーの愛媛大学理学部佐藤久子研究員らが開発した 100 μm （マイクロメートル）の空間分解能を持つ顕微スキャン型多次元赤外円二色性分光装置（※4）による局所タンパク質高次構造解析（※5）を組み合わせ、モンスズメバチ（※6）の左右後翅の左右非対称性を解析しました。

高分解能走査電子顕微鏡観察の結果、翅表面は長さ 100 μm 直径 6 μm の棘状の毛に覆われており、棘の表面には螺旋状の溝があることがわかりました（図 1）。螺旋状の溝には左巻きと右巻きがあり、後翅の前縁部分と中室部分における巻きの左右分布を調べたところ、前縁部分では左翅には右巻き螺旋、右翅には左巻き螺旋と左右非対称の関係にあることがわかりました（図 2、3）。中室部分においては、同じ翅の中で巻き方向のばらつきはありますが、左翅では左巻き螺旋、右翅では右巻き螺旋が優勢であるという傾向が見られました。さらに、顕微スキャン型多次元赤外円二色性分光装置により、棘と翅膜部分を含む領域から振動円二色性分光スペクトルを取得し、タンパク質高次構造の解析を行いました。

取得したスペクトルから、分析した領域の大部分を占める翅膜を構成するタンパク質の二次構造は β -シート構造であり、左右の後翅で差がないことがわかりました。これは電子顕微鏡による観察でも棘の螺旋状模様の巻き方向以外の違いは確認できなかったことと一致しています。左右翅のタンパク質構造の違いを明確にするため左翅と右翅の同じ位置から取得したスペクトルの差分をとったところ、棘を構成するタンパク質は翅膜と異なる高次構造をもつことが明らかになりました。その構造は α -ヘリックス構造またはねじれた β -シート構造である可能性があります。どちらの場合でも、左翅前縁部分の棘は右巻きにねじれた構造、右翅前縁部分の棘は左巻きにねじれた構造によって構成されていることが明らかとなりました。一方、螺旋模様の巻き方向にばらつきがあった中室部分では、棘を構成するタンパク質の高次構造によって左右翅の巻き方向の違いは説明できませんでした。今後、より詳細なタンパク質構造の解析を行うことで、螺旋状微細構造の左右翅非対称性の起源が明確になることが期待されます。

本研究では、研究チームがこれまで無機物質の解析を通して培った技術と経験を活かし、分析対象を生物へも拡張しました。その結果、モンスズメバチの微細構造に左右非対称性があることを明らかにし、形態的な左右非対称性は構成するタンパク質高次構造によって制御されることを示しました。昆虫翅の左右非対称性は、高空間分解能での微細構造の観察と局所タンパク質構造解析はこれまで行われてこなかったため発見されていませんでしたが、他の昆虫の翅でも広く観察される可能性があります。本研究により昆虫翅の左右の関係を詳細に解析することの重要性が示されたことで、今後、他の昆虫でも検証が進めば生物の体の左右非対称性の起源が明らかになることが期待されます。さらに、このような生物の生体構造と特異的機能を活用する「生物模倣（バイオメティクス）」という方法があります。ハスの葉の表面の模様を参考にした撥水性をもつ素材はよく知られた例です。本研究で発見された微細構造の左右の関係は、そのようなアプローチにも寄与すると期待されます。

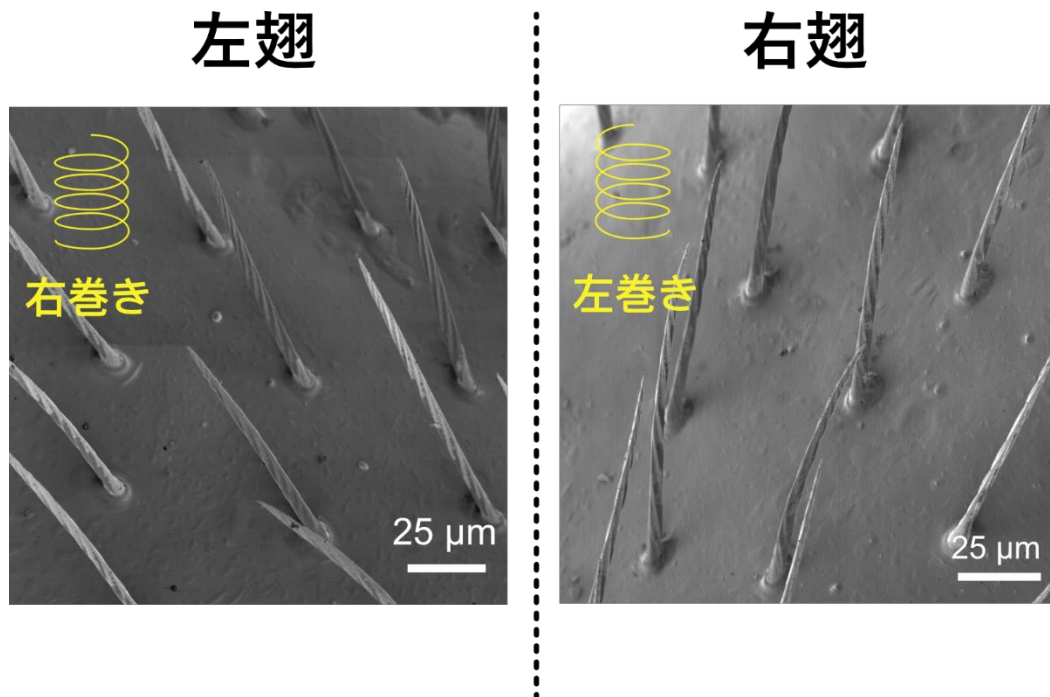


図1．モンズメバチ左翅（左）と右翅（右）の前縁部で観察された棘状の毛の走査電子顕微鏡像。螺旋状模様の巻き方向は図中に記載している。

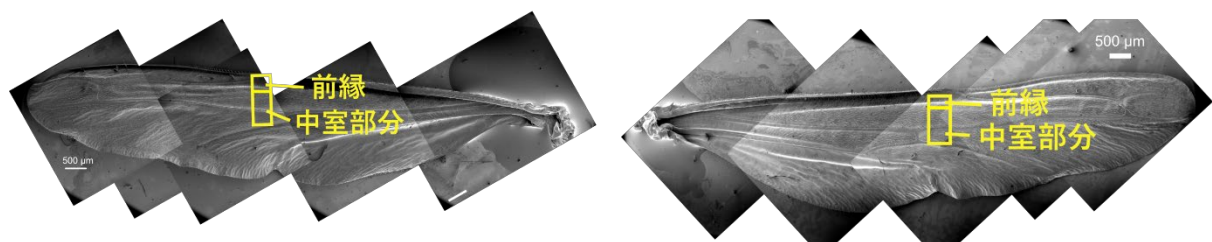


図2．モンズメバチ左翅（左）と右翅（右）の全体像。複数の走査電子顕微鏡像を組み合わせている。詳細観察を行った位置を図中に記載している。

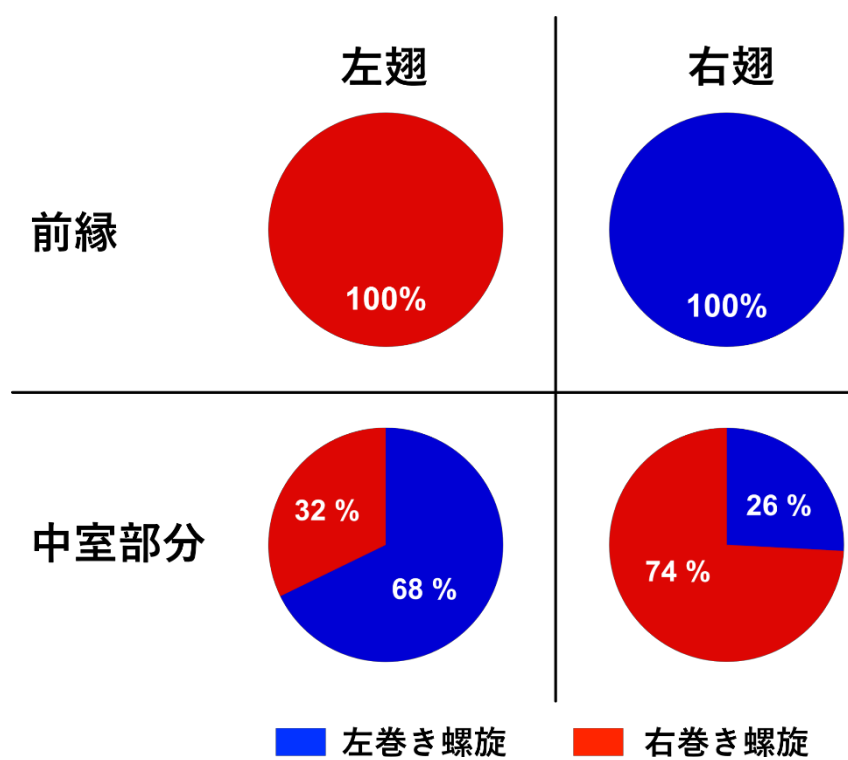


図 3 . 左右翅の前縁と中室部分で左巻き螺旋と右巻き螺旋の頻度。

【用語解説】

マイクロメートルスケール（※1）：

1 マイクロメートル（ μm ）は 1 mm の千分の一の長さ。1 μm から数百 μm 程度の長さの領域を指す。ちなみに、髪の毛の太さは約 100 μm 。

空間分解能（※2）：

近い位置にある 2 点を 2 点として見分ける能力。

電界放出型走査電子顕微鏡（※3）：

細く絞った電子線で試料表面を走査（スキャン）することで、試料の拡大像を得る顕微鏡。電界放出型の電子銃を搭載した本顕微鏡では数 nm（ナノメートル；百万分の一ミリメートル）の構造を観察することができる。

顕微スキャン型多次元赤外円二色性分光装置（※4）：

世界で唯一の量子カスケードレーザー光源と自動ステージによるスキャンシステムを組み合わせたキラリティを持つ分子の構造を決定できる装置。空間分解能 100 μm スケールで局所的な分子の立体構造の解析が可能となった。

タンパク質の高次構造（※5）：

タンパク質はアミノ酸から構成され、アミノ酸が直線上につながった高分子をポリペプチド鎖と呼ぶ。ポリペプチド鎖が折りたたまれ立体的な構造（二次構造）をとる。二次構造には α -ヘリックス構造と β -シート構造があり、ポリペプチド鎖が規則正しく螺旋状に巻いた構造を α -ヘリックス、ポリペプチド鎖が平行に並んで配置したシート状の構造を β -シートと呼ぶ。さらに、この二次構造が組み合わさって立体構造（三次構造）作りタンパク質の形をつくる。二次構造以上の立体的なタンパク質の構造を合わせて高次構造と呼ぶ。

モンズズメバチ（※6）：

学名は *Vespa crabro flavofasciata* Cameron 1903。愛媛県で絶滅危惧種に指定されている。本研究では愛媛県今治市で回収されたモンズズメバチの遺骸から取得した翅を使用している（愛媛県立衛生環境研究所提供）。

【論文情報】

掲載誌 : Physical Chemistry Chemical Physics (PCCP)

題名 : Left-right Asymmetry in the Microstructure of the Hindwings of European Hornet Revealed by Scanning Electron Microscopy and Microscopic Vibrational Circular Dichroism (走査電子顕微鏡法と顕微振動円二色性分光法により明らかにするモンズズメバチ後翅微細構造の左右非対称性)

著者 : Sayako Inoué, Hisako Sato and Akihiko Yamagishi (井上紗綾子、佐藤久子、山岸皓彦)

DOI: 10.1039/D5CP01013F

<https://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2025/CP/D5CP01013F>

【研究助成】

日本学術振興会科学研究費補助金（科研費）、課題番号：JP22H02033

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

愛媛大学 先端研究院 地球深部ダイナミクス研究センター

助教 井上 紗綾子

電話 : 089-927-8611 E-mail : inoue.sayako.nr@ehime-u.ac.jp

(プレスリリースに関すること)

愛媛大学総務部広報課

電話 : 089-927-9022 E-mail: koho@stu.ehime-u.ac.jp

愛媛大学先端研究院地球深部ダイナミクス研究センター（GRC）

電話 : 089-927-8165 E-mail: grc@stu.ehime-u.ac.jp