



平成 31 年 1 月 11 日

報道関係者各位

国立大学法人 筑波大学
横須賀市自然・人文博物館

有翅昆虫類の系統樹の構築 ～身近なバッタ、カマキリなどからなる多新翅類の祖先型を復元～

研究成果のポイント

1. 100 種を超える昆虫類の約 3,000 の遺伝子を解析することで、多新翅類昆虫^(注1)の信頼度の高い系統樹を構築しました。
2. 得られた系統樹に沿って 100 を超える形態・生活型に係る形質を比較解析し、折りたためる翅を初めて獲得した祖先型の姿を復元しました。
3. 昆虫類の翅は、水中生活で獲得されたものではなく、滑空器として陸上で獲得されたことが示唆されました。

国立大学法人筑波大学 生命環境系 町田龍一郎教授、同山岳科学センター菅平高原実験所昆虫比較発生学研究室の内船俊樹(現 横須賀市自然・人文博物館)、清水将太(現 松本秀峰中等教育学校)、真下雄太(現 北里大学)、藤田麻里を含む、世界10カ国、21研究機関の研究者25名からなる研究グループは、現生の昆虫106種の約3,000の遺伝子についてトランスクリプトーム解析^(注2)を行い、比較形態学・比較発生学からの評価も踏まえ、多新翅類は単一の系統^(注3)であることを確証し、極めて信頼度の高い系統関係を提出しました。そして、この系統関係に沿って、112の形態ならびに生活型に係る形質を比較検討することで、多新翅類の祖先型を描くとともに、多新翅類内での特徴の変遷を明らかにしました。さらに、有翅昆虫類の初期進化を議論し、昆虫類の翅が水生生活を通して獲得されたとする考えを否定し、翅は滑翔用の器官として陸上で獲得されたとする説を強く支持することになりました。

本研究は、昆虫類全体の系統進化を明らかにしようとする「1000種昆虫トランスクリプトーム進化プロジェクト」(1KITE)のサブプロジェクトの一つ、「多新翅類サブプロジェクト」からの成果です。

本研究の成果は、2019年1月14日(米国東部時間)以降に「米国科学アカデミー紀要 [Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)] 誌」で公開される予定です。

研究の背景

昆虫類は最大級の多様性を誇る生物グループであり、農業や医療健康面といった実用面だけでなく、形態や生態の多様性から大きな関心が向けられてきた、とても重要な動物グループです。昆虫がこれほどの多様性を獲得した秘訣の一つは、翅を獲得し、さまざまな生活域(生態的地位)に進出できたことです。しかし翅の起源に関して、発生学的な仕組みについての目途はついたものの(Mashimo and Machida, 2017)、翅をもつ大きなグループ(新翅類)が多様化した過程については多くの謎が残っていました。新翅類とは、トンボ・カゲロウ類(旧翅類)を除くすべての有翅昆虫を含む大グループであることから、新翅類の進化は昆虫を理解する上で

鍵となりますが、その全容は掴みにくいものでした。

その理由は、新翅類を構成する 3 グループのうち、準新翅類(カメムシ目、シラミ+チャタテムシの咀嚼目、アザミウマ目の 3 目)と完全変態類(ハチ目、チョウ目、ハエ目、カブトムシ目などの 9 目)はそれぞれ共通する大きな特徴があるためイメージが描きやすいのに対し、新翅類の初期進化に直接由来する多新翅類(バッタ目、ゴキブリ目、シロアリ目、カマキリ目、ハサミムシ目、ジュズヒゲムシ目、カカトアルキ目、ガロアムシ目、ナナフシ目、シロアリモドキ目)は目ごとの特殊化が著しく、「多新翅類とはどのようなものか?」、「多新翅類内の目間の系統関係は?」など、謎だらけであるからです。つまり、新翅類の起源や初期進化を考える上で最も重要な多新翅類の理解が不十分だったわけで、これが大きな問題でした。

研究内容と成果

多新翅類72種を含む現生の昆虫106種のタンパクコード遺伝子3,014個についてトランスクリプトーム解析を行い、さらに比較形態学および比較発生学の視点から厳密な評価を行うことで、極めて信頼度の高い多新翅類各目の系統関係を提出しました(参考図1)。そして、この系統関係に沿って、112の形態ならびに生活型についての形質を比較検討することで、多新翅類の祖先型を復元し(参考図2)、さらに多新翅類内での特徴の変遷を推論しました。さらに、有翅昆虫類の初期進化も議論し、昆虫類の翅獲得が水中でなく陸上で起こったとする考えを強く支持することになりました。

得られた主な結果は以下のとおりです。

● 多新翅類の単系統性

多新翅類はしばしば起源の異なるグループの寄せ集めであり、一つの系統(単系統)ではないとの指摘がありました。本研究で多新翅類の単系統性が強く支持されました。

形態からは多新翅類の単系統性を示すデータは得られていませんでしたが、日本の研究グループは、比較発生学的研究により、二つの明確な多新翅類の単系統性を強く支持するデータを提出しました。

● 多新翅類内の系統関係

参考図1のような系統関係が明らかになりました。各分岐は 100%の確率で支持されています。「ジュズヒゲムシ目とハサミムシ目」、「カカトアルキ目とガロアムシ目」、「ナナフシ目とシロアリモドキ目」、「カマキリ目とゴキブリ目、シロアリ目」のそれぞれがグループを作り、「カカトアルキ目+ガロアムシ目」と「ナナフシ目+シロアリモドキ目」が姉妹群、さらにその姉妹群として「カマキリ目+ゴキブリ目+シロアリ目」、さらにこれらの姉妹群として「バッタ目」、これらをすべて合わせたものの姉妹群として「カワゲラ目」が、さらに、これら「カカトアルキ目+ガロアムシ目」+「ナナフシ目+シロアリモドキ目」+「カマキリ目+ゴキブリ目+シロアリ目」+「バッタ目」+「カワゲラ目」の姉妹群として「ジュズヒゲムシ目+ハサミムシ目」が位置づけられます。

● 多新翅類の祖先型

多新翅類の基本的特徴を明らかにしたことにより、参考図2に示すように多新翅類の祖先型が明らかになりました。1)頭部は口が下を向く下口式、2)顎は単純な咀嚼型、3)比較的長い触角、4)胸部の 3 体節はほぼ同形、5)肢の最先端節である跗節は 5 分節、6)前翅は腹部の上にたたまれ、その下に膜状の後翅を保護、6)腹部末端に長い分節した1対の尾糸(尾角)、7)幼虫、成虫とも地上性で、しばしば土壌や落葉、樹皮下などに潜入する生活をしていたと考えられます。

● 多新翅類内での特徴の変遷

バッタ目、ナナフシ目、カマキリ目などは草や木の上で生活していますが、これらはもともとの地上生活からの進化にともなって新たな生息域に進出するようになった結果と考えられます。また、口が前を向いている前口式の頭部は肉食性の昆虫の特徴ですが、肉食性のカマキリ目やカカトアルキ目は祖先型と同じに下口式です。これは、これらの昆虫が前肢を捕獲肢として特殊化させたことなどで、獲物をまず口で捕えるという

捕食行動が生まれなかったためと考えられます。

● 昆虫の翅獲得のシナリオ

昆虫の翅の獲得に関しては、は水中生活を経て獲得されたという説と、翅が地上生活で滑空器として発達してきたとする説の二つがあります。前者の「翅の水中獲得説」は、有翅昆虫類の原始系統群である旧翅類を構成するカゲロウ目とトンボ目両目の幼虫は水生で、これらの幼虫は葉状の鰓で呼吸しており、この鰓が発達して翅が獲得されたという考え方です。多新翅類の最原始系統群と長らく考えられてきたカワゲラ目の幼虫が水生であることも、この考えには好都合でした。

しかし、本研究から、1)カワゲラ目は多新翅類の最原始系統群ではないこと、2)多新翅類の祖先型が地上性であることが明らかになり、さらに、3)化石の証拠から旧翅類の原始的なグループが生活史を通して陸生であることが明らかになったことで、「翅の水中獲得説」は根拠を失いました。

そこで、「翅の陸上獲得説」、すなわち、胸部の背中の板(背板)が拡張して滑空器として機能し、やがてそれが拡張・発達して翅獲得に至ったとする考え方が有利となりました。

今後の展開

「多新翅類とはどのようなものか?」という長年の問いに対して、ようやく答えが出てきました。多新翅類についての情報が混乱してきたことで滞っていた昆虫の理解が、ようやく進み始めることになります。このことは、生物学における昆虫学の発展が期待できるばかりでなく、昆虫と人との係りで生じてくる問題の解決、昆虫の生物資源としての活用などにも貢献することになるでしょう。

参考図

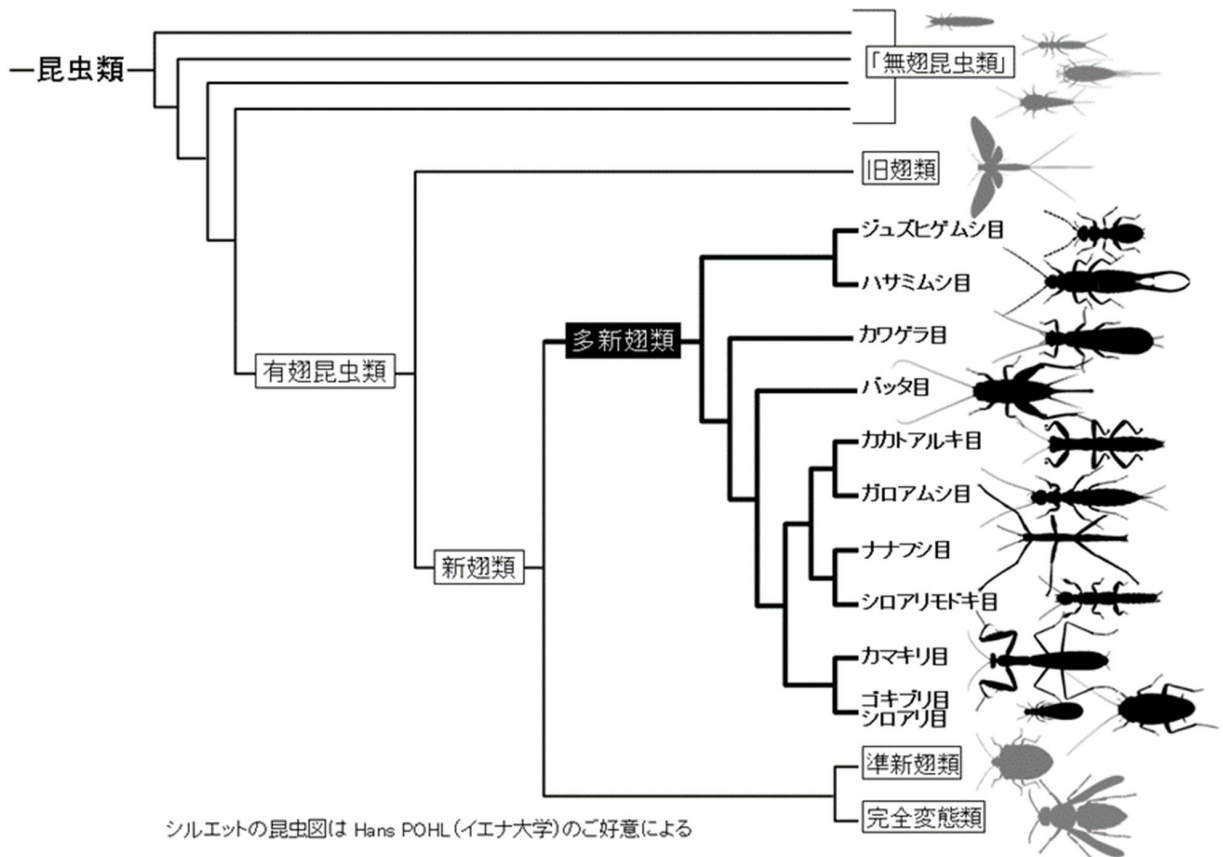


図1 本研究で導かれた多新翅類各目の類縁関係



図2 本研究から描かれた多新翅類の祖先型

用語解説

注1) 多新翅類昆虫

バッタ目、ゴキブリ目、シロアリ目、カマキリ目、ハサミムシ目、ジュズヒゲムシ目、カカトアルキ目、ガロアムシ目、ナナフシ目、シロアリモドキ目からなる大グループ(参考図1も参照)。昆虫類はまず、原始的でまだ翅を獲得していない「無翅昆虫類」と、昆虫類の99%を占める翅を獲得した有翅昆虫類に分けられます。有翅昆虫類は、その1%であるカゲロウ目とトンボ目からなる旧翅類、残りの99%で、昆虫類の大部分を占める新翅類に分かれます。新翅類は旧翅類と異なり、翅をねじって折りたたむことができるようになったグループです。この新翅類は、さらに、その初期進化に直接由来する、私たちに馴染み深いバッタ目、ゴキブリ目、シロアリ目(しばしばゴキブリ目に含められる)、カマキリ目、ハサミムシ目、ナナフシ目、さらにジュズヒゲムシ目、カカトアルキ目、ガロアムシ目、シロアリモドキ目の10目ないし11目からなる多新翅類、基本的に吸収口をもち尾毛を欠くなどの明瞭な特徴で纏め上げられる、カメムシ目、シラミ+チャタテムシ(咀嚼目)、アザミウマ目の3目からなる準新翅類、蛹という段階を経て成虫になる完全変態を行うという大きな特徴をもつ、ハチ目、チョウ目、ハエ目、カブトムシ目などの9目からなる完全変態類に分けられます。

注2) トランスクリプトーム解析

細胞内の全DNAの塩基配列情報を指す「ゲノム」に対して、細胞内の全転写産物(すべてのRNA)を「トランスクリプトーム」と呼びます。

「1000種昆虫トランスクリプトーム進化プロジェクト」(“1K Insect Transcriptome Evolution (1KITE)”): 以下、1KITE)は、このトランスクリプトームを昆虫類1000種(1K)について解析・比較することで、昆虫全体の系統進化を明らかにしようとする、13カ国・地域、43研究機関の研究者101名(日本の研究者は計10名)による国際研究プロジェクトです。1KITEの代表的な最初の成果は、昆虫類全体の系統進化の大筋を論じた論文で、サイエンス誌に発表されました[Misof et al. (2014) Phylogenomics Resolves the Timing and Pattern of Insect Evolution (遺伝子情報によって明らかとなった昆虫の進化パターンと分岐時期). *Science*, 346: 763-767]。1KITEは本研究の「多新翅類サブプロジェクト Polynoptera Subproject」(5カ国12名、うち日本の研究者は5名)を含む11のサブプロジェクトからなっています。1KITE Projectのホームページ: <http://www.1kite.org/index.html>

注3) 単一の系統

単系統性といい、単一の祖先に由来するすべての種群を含んだ系統群であることを指します。

参考文献

Mashimo, Y. and R. Machida, *Scientific Reports*, 13, 77–85 (2017).

掲載論文

【題名】 Evolutionary History of Polyneoptera and Its Implications for Our Understanding of Early Winged Insects

(解明された多新翅類の進化の歴史とそれが昆虫類の理解する上での意義)

【著者名】 Benjamin Wipfler (イエナ大学)他 24 名 (日本の著者は計 5 名)

【掲載誌】 Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)
doi/10.1073/pnas.1817794116

問い合わせ先

町田 龍一郎 (まちだ りゅういちろう)

筑波大学生命環境系、山岳科学センター 教授

〒386-2204 長野県上田市菅平高原 1278-294 筑波大学山岳科学センター菅平高原実験所

内船 俊樹 (うちふね としき)

横須賀市自然・人文博物館 学芸員

〒238-0016 神奈川県横須賀市深田台 95