



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Neuroanatomy of insects in amber [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	谷口, 諒
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第16258号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95372
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Ryo_Taniguchi_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（理 学） 氏 名 谷口 諒

学 位 論 文 題 名

Neuroanatomy of insects in amber
(琥珀内昆虫化石の神経解剖学的研究)

昆虫は現在 100 万種以上が知られ、全生物種の半分以上を占める繁栄を遂げている。彼らは 4 億年に及ぶ長い進化史をもっており、誕生以来、主要な構成要素として陸上生態系を支える不可欠な役割を担ってきた。昆虫 4 億年の進化史において最大の適応的発明のひとつが、微小かつ洗練された神経システムである。彼らの神経系は極めて少ない神経細胞数で構成される一方で、複雑な行動やコミュニケーションなどを可能にする優れた情報処理能力を有している。中でも昆虫の末梢感覚系は、必要な情報を選別して中枢に送る機能を備えている点で注目に値する。昆虫は、この「地方分権」的な末梢での情報スクリーニングにより、処理能力に限界がある微小な脳を補っている。こうした地方分権型の神経システムでは、インプットされる特定の感覚情報と、これに応答してアウトプットされる行動を直接リンクできる。そのため、末梢感覚器官の解剖学・機能形態学的解析から持ち主の行動生態を推定できる場合がある。そして、これら昆虫の微小センサーはキチン質外骨格で構成されているため、高い化石化ポテンシャルを有している。したがって、昆虫最大の進化的発明である神経システムを直接証拠として、彼らの進化史・古生態を復元できる可能性がある。

本研究では、最も優れた化石保存媒体である琥珀に保存された昆虫化石を材料とした。琥珀の化石化ポテンシャルは極めて高く、鉱物質骨格を持たない昆虫であっても微小構造まで三次元的に保存される。ところが、伝統的に用いられてきた低解像な可視化手法（マクログラフィ・X 線 CT）では、サブミクロンスケールの昆虫感覚器官を詳細に解析できない。そのため従来研究では、昆虫化石に対して神経解剖学的な視点を導入できず、感覚情報を根拠とする高解像な行動生態復元を実現できていなかった。

これに対して本研究では、従来手法に加えて新たな破壊的可視化手法を開発することで、昆虫感覚器官の詳細な形態解析と生態復元への応用を可能にした。材料には白亜紀の琥珀に保存されたゴキブリ（第 1 章）、アリ（第 2 章）、カマキリ（第 3 章）の化石を利用した。これらは現生の神経科学における主要なモデル生物であり、豊富な解剖学・生理学・行動学的知見が蓄積されている。したがって、昆虫化石を用いた神経解剖学と行動生態復元を初めて実践するにあたり、最適な分類群として選定した。

第 1 章では、約 1 億年前のミャンマー産琥珀に保存されたゴキブリの複眼と触角に注目し、解析手法のプロトタイピングと行動生態復元への適用を行った。神経科学における伝統的モデル生物であるゴキブリは、3 億年前に出現した特に古い起源をもつため、昆虫感覚系の長期進化を議論する上でも重要である。従来の非破壊手法が昆虫センサーの可視化に十分な分解能を得られなかった原因は、光の散乱で引き起こされる光学ノイズにあった。そこで、本研究では化石触角を精密に切断し、触角を含む 200 μm 厚の琥珀プレパラートを作製することで、触角表面の微小センサーである感覚子を可視化した。また、マクログラフィと X 線 CT も活用し、複眼を構成する個眼数を推定した。解析の結果、化石ゴキブリの触角表面には精細に保存されたサブミクロンスケールの感覚子構造が発見され、現生種との直接的な形態比較と、それに基づく機能推定が可能であることが分かった。本化石ゴキブリでは、現生夜行性種と比べて触覚や嗅覚を担う感覚子の発達が弱い一方で、多くの個眼を備える発達した複眼を持っていた。したがって、本種は多くの現生ゴキブリと異なり明環境に適応

した昼行性だったと考えられる。また、ゴキブリと近縁ながら異なる触角感覚系を持つ現生カマキリとの比較から、本化石種がカマキリに類似した性フェロモンコミュニケーションを取っていた可能性が明らかになった。白亜紀のゴキブリは、現在よりも多様な行動生態システムを有していたと考えられる。

第2章では、約1億年前のミャンマー産琥珀に保存された最古のアリ化石に注目し、進化的初期におけるアリのコミュニケーション様式や社会性を復元した。アリはヒトをも凌ぐバイオマスを誇る特に成功した社会的動物であり、その高度な社会は様々な触角感覚子で処理されるフェロモンコミュニケーションに支えられている。本研究では、第1章の破壊手法を発展させた「琥珀内微小化石の回転可視化法」を開発し、アリ触角化石における感覚子とその分布を明らかにした。解析の結果、白亜紀のアリは警報フェロモンに応答するアリに固有の感覚子を既に獲得していた。また、現生の真社会性ハチ目（アリ、スズメバチ、ミツバチ）に共通する、巣仲間識別感覚子に特有の分布パターンも獲得していた。アリは進化的最初期にあたる白亜紀の段階で、フェロモンを介した警報伝達や巣仲間識別を行い、高度な社会を営んでいたと考えられる。このことは、新生代以降に生じた、陸上生態系におけるアリの生態学的台頭に先んじて、発達した社会性が進化していたことを示している。

第3章では、約9000万年前の北米ニュージャージー産琥珀に保存されたカマキリ化石の複眼に注目し、両眼立体視機能と捕食生態の復元を行った。カマキリは無脊椎動物として初めて立体視可能であることが確認された視覚系のモデルである。彼らの複眼は琥珀内で三次元的に極めて良好に保存されるため、現生種と同様の形態解析手法を用いて個眼数や両眼視野などの視覚特性を明らかにできる。マクログラフィとX線CTを用いた三次元形態解析と現生種との比較により、最小クラスのカマキリである本化石種は、体サイズに対して非常に多くの個眼を備えた巨大な複眼を持ち、現生派生種よりも広い両眼視野角を持っていたことが分かった。これらの特徴は、原始的で小さな白亜紀のカマキリが、優れた視覚解像度や立体視・獲物認識能力を有しており、現生種に匹敵する適応的捕食者であったことを示している。

以上の研究により、神経科学を代表する3種類のモデル昆虫を活用することで、化石に保存された神経解剖学的特徴を直接証拠として、インプットされる感覚情報と、それに応じてアウトプットされる高度な行動の復元に初めて成功した。従来の神経系化石を材料とした研究では、保存が不完全な化石や新生代の化石を材料としていたため、現生種との比較に基づく機能の復元や、それらの億年スケールの生命進化における神経行動学的な重要性を議論できなかった。そのため、これらの研究では、時間軸上における特定の神経構造の出現時期のアンカーにしか解剖学的特徴を活用できていなかった。本研究では、最も優れた化石保存媒体である琥珀内で保存されながら、従来見過ごされてきた昆虫微小センサーの化石を発見し、その解剖学に現生の神経科学的知見を融合することで絶滅昆虫の複雑な行動生態を復元できることが示された。