HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on the hair plate proprioceptors in antennal mechanosensory system of crickets : Developmental and neuroanatomical perspectives
Author(s)	呂, 惠
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(生命科学)
Dissertation Number	甲第17010号
Issue Date	2026-06-30
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k17010
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/100063
Type	doctoral thesis
File Information	Hui_LYU_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称： 博士(生命科学) 氏 名 呂 惠

学 位 論 文 題 名

Study on the hair plate proprioceptors in antennal mechanosensory system of crickets −Developmental and neuroanatomical perspectives—
(コオロギ触角機械感覚システムにおける毛板自己受容器の研究 −発生学的、神経解剖学的観点から−)

コオロギやゴキブリなどの昆虫は、触角を用いて能動的に周囲の環境を走査し、障害物を知覚する。このアクティブセンシングでは、物体への接触とともに、走査している触角の位置情報が重要な手掛かりとなる。そのため、触角の基部には、毛板（hair plate）と呼ばれる機械感覚子の集合体が存在し、触角の位置や運動を脳に伝える自己受容器として機能している。これらの感覚器は、運動に伴う触角の姿勢変化を検出することで、アクティブセンシングを成立させる基盤となっている。また、これらの不完全変態昆虫では、孵化直後の幼虫もすでに触角を備え、外界を探索する行動を示す。したがって、毛板は発達初期から空間認知や運動制御に重要な役割を果たすと考えられる。しかし、毛板を構成する機械感覚子の形態や空間配置が発達に伴ってどのように変化していくのか、これまでほとんど明らかにされていなかった。

そこで本研究は、フタホシコオロギ（*Gryllus bimaculatus*）を用い、発達段階に応じた毛板の外部形態と感覚子の３次元配置、さらにそれらの求心性線維の中枢投射様式を解析し、触角機械感覚系における空間情報表現の構造的基盤を明らかにすることを目的とした。コオロギの触角は、上下の動きは頭と柄節の関節により、左右の動きは柄節と梗節の関節で制御されており、この二つの関節がほぼ直交する単純な構造をなしている。このように、触角の動きと関節の構造の対応関係が明確であるため、ゴキブリやナナフシに比べて、触角運動と感覚入力との関係を解析しやすいという利点がある。したがって、コオロギは触角の運動制御機構や、毛板による固有受容入力の符号化を研究する上で非常に適した材料であり、アクティブセンシングの神経基盤を理解するための優れたモデル動物である。これらの特徴を踏まえ、本研究では、走査電子顕微鏡による微細構造の観察と共焦点レーザー顕微鏡を用いた三次元再構成を組み合わせ、各発達段階における毛板構造の変化を定量的に比較した。さらに、蛍光色素による神経標識法を用いて毛板感覚子の求心性線維を可視化し、中枢神経系における投射経路を明らかにした。

第一章では、成虫コオロギの触角基部に存在する毛板の形態的特徴とその三次元的配置を詳細に解析した。柄節および梗節にはそれぞれ背側・腹側・内側・外側の４箇所に毛板が存在し、個々の感覚毛の位置・長さ・本数を座標情報として定量化した。その結果、毛板の配置様式は左右対称性を保ちながら、個体間で高い再現性を示した。さらに、各毛板内部においても、感覚毛は一定の相対位置関係を保った規則的な配列を形成していた。また、各毛板の傾斜

角度や配向の差から、背腹方向の毛板は触角の仰角運動、内外側の毛板は水平方向の運動に対応していることが示唆された。これらの結果は、成虫における固有受容入力の空間的基盤が、構造的に明確に分化していることを示している。

第二章では、第一章で確立した三次元解析法を用い、初齢幼虫から成虫に至るまでの発達段階における毛板構造の変化を定量的に比較した。各齢において毛板感覚子の数は段階的に増加し、脱皮による節の拡大に伴って、既存の感覚毛が保持されたまま、その間に新たな感覚子が追加されていくことが分かった。また、毛板を構成する感覚毛群の空間配置は発達段階を通してよく保存され、同一齢の個体間でも高い一致性を示した。これにより、毛板の空間的配置は遺伝的に制御されており、発達に伴うサイズ拡大の中でも感覚入力の空間分解能が維持されることが明らかとなった。さらに、感覚毛の長さ分布には発達に伴う変化が見られ、短毛と長毛が混在する構造によって、角度検出の精度が確保されている可能性が示唆された。これらの結果から、毛板の発達は単なる数的増加ではなく、空間的秩序を保ちながら感覚受容特性を精緻化する過程であることが明らかになった。

第三章では、毛板感覚子の求心性線維の中枢投射を解析し、触角機械感覚運動中枢（antennal mechanosensory and motor center: AMMC）および食道下神経節（subesophageal ganglion: SOG）における神経投射様式を明らかにした。本研究では、成虫の柄節背側および梗節外側の毛板からそれぞれ異なる蛍光色素を導入して順行性二重染色を行い、脳内での軸索経路を比較した。その結果、いずれの毛板からの線維も触角葉腹側に位置する AMMC に収束し、内側に軸索側枝を分枝した後、さらに軸索は脳から SOG へ下行して終末していた。毛板の位置による投射領域の明確な差異は見られなかったが、AMMC 内の軸索側枝の形態や走行方向にはわずかな違いが認められた。これらの結果は、触角の異なる運動軸に対応する毛板入力が同一領域で統合され、運動出力に結合する仕組みを持つ可能性を示している。

以上の解析から、コオロギの毛板は発達初期から成虫まで一貫して高度に秩序化された空間配置を保持し、脱皮や成長に伴う形態変化の中でも感覚受容野を安定的に維持していることが明らかとなった。さらに、毛板感覚子の求心性線維は AMMC および SOG に投射し、触角運動の制御に関与する中枢神経回路の一部を構成していると考えられる。これらの結果は、昆虫の触角機械感覚系における空間情報表現の発達的および神経解剖学的基盤を明確にし、構造化された感覚入力がどのようにして文脈依存的な運動出力へと変換されるのかを理解する上で、重要な手掛かりを提供するものである。