

# 昆虫工学

— 新しい価値を創造する  
「昆虫の知能」の解明と応用 —

神崎 亮平 【監著】

櫻井 健志

並木 重宏 【編著】

光野 秀文

祐川 侑司

コロナ社

## 執筆者一覧 (執筆箇所順)

かん 神	ぎき 崎	りょう 亮	へい 平	(東京大学先端科学技術研究センター シニアリサーチフェロー, 監著者)	: まえがき, あとがき
さくら 櫻	い 井	たけ 健	し 志	(東京農業大学, 編著者 (第1章))	: 1.1 節, コラム 3, あとがき
あさ 朝	の 野	つな 維	き 起	(東京都立大学)	: 1.2 節
あん 安	どう 藤	のり 規	やす 泰	(前橋工科大学)	: 1.3 節, コラム 2
あお 青	ぬま 沼	ひと 仁	し 志	(神戸大学)	: 1.4 節
お 小	がわ 川	ひろ 宏	と 人	(北海道大学)	: 1.5 節
ほう 北	じょう 條	まさ 賢	ひろ 宏	(関西学院大学)	: 1.6 節
なみ 並	き 木	しげ 重	ひろ 宏	(東京大学, 編著者 (第2章))	: 2.1 節, あとがき
お 小	がわ 川	ゆ 裕	り 理	(フリンダース大学 (豪))	: 2.2 節
たか 高	はし 橋	なお 直	み 美	(総合研究大学院大学)	: 2.3 節
ふじ 藤	わら 原	てる 輝	あ 史	(理化学研究所)	: 2.4 節
た 田	ぶち 渕	まさ 史	し 史	(ケース・ウェスタン・リザーブ大学 (米))	: 2.5 節
みつ 光	の 野	ひで 秀	ふみ 文	(東京大学, 編著者 (第3章))	: 3.1 節, あとがき
きの 木	した 下	みち 充	よ 代	(総合研究大学院大学)	: 3.2 節
にし 西	の 野	ひろ 浩	し 史	(北海道大学)	: 3.3 節
さ 佐	とう 藤	こう 幸	じ 治	(東京大学)	: 3.4 節
わた 渡	なべ 邊	ひろ 英	ひろ 博	(福岡大学)	: 3.5 節
そ 曾	か 我	べ 部	たか 彰	(生理学研究所)	: 3.6 節
すけ 祐	かわ 川	ゆ 侑	し 司	(東京大学, 編著者 (第2部))	: 第4章, 5.2 節, あとがき
たか 高	なし 梨	たく 琢	ま 磨	(福島大学)	: 5.1 節
むら 村	た 田	み 未	か 果	(農業・食品産業技術総合研究機構)	: 5.1 節
なか 中	もと 本	たか 高	みち 道	(東京科学大学)	: 5.2 節
か 加	沢 沢	とも 知	き 毅	(東京大学)	: 6.1 節
うめ 梅	づ 津	しん 信	じ 二	(早稲田大学)	: 6.2 節
さ 佐	とう 藤	ひろ 裕	たか 崇	(南洋理工大學)	: 6.2 節
あお 青	の 野	ひかる 光	ひかる 光	(東京理科大学)	: 7.1 節
くら 倉	ぼや 林	だい 大	すけ 輔	(東京科学大学)	: 7.2 節
し 志	がき 垣	しゅん 俊	すけ 介	(国立情報学研究所)	: 7.3 節
たて 立	いし 石	こう 康	すけ 介	(関西学院大学)	: コラム 1

(所属は2026年5月現在)

# まえがき：昆虫工学の重要性

## 1 はじめに

地球上には数百万種を超える多様な生物が生息し、その生活環境は地上、地中、水中、海中などあらゆる領域に及ぶ。生物はこのようなさまざまな生活環境に応じて、多様な構造と機能を獲得した。なかでも生物種のじつに50%（100万種）以上を占める昆虫が示す多様な形態や想像を超えた能力は、われわれに驚きとともに感動を与えてきた。

奇しくも2024年8月25～30日に、昆虫に関わるすべての研究領域の研究者が4年ごとに世界から一同に集い成果を共有する「第27回国際昆虫学会議」が、国立京都国際会館で開催された。本会議は1910年にベルギーのブリュッセルで第1回が開催され110年以上の歴史をもつ最も大きな国際学会の一つである。日本では1980年に京都で開催されて以来、じつに44年ぶりの開催となった。82の国と地域から4000名以上の昆虫研究者が参集し、「New Discoveries through Consilience（知の統合を通じた新たな発見）」をテーマに、未来を見据えた世界との連携を目標に掲げ、進化生物学、分子生物学、応用／農業昆虫学、衛生昆虫学・環境変動、多様性・系統分類・保全、行動・生態・生理と多岐にわたる分野から議論が展開された。そして、さまざまな分野の交流と融合が図られ、持続可能な社会の形成が強く求められる現代における昆虫学の意義が国内外にアピールされた。

本著の監修を務める神崎亮平は、同会議のプレナリー講演を光栄にも仰せつかり、「Learning from Insect Intelligence -From a Nature-Centered Perspective-」の演題で講演をさせていただいた。昆虫の能力（知能）には学ぶべき点が多いことは周知の事実と思うが、講演では一歩踏み込んで、「Nature-Centered（自然中心）」という視座を重視した。その理由はつぎのとおりである。

これまでの科学技術は、まず人と自然を切り離して自然を研究の対象とし、人を中心として発展を遂げてきた。このような視座によってわれわれは、自然から発見した原理や法則をもとに科学技術を築き、自然にはないものを作る技術、すなわち工学を確立し、多くの恩恵をわれわれ自身にもたらした。一方で、対象とした自然への過剰な負荷から、環境問題やエネルギー・資源の枯渇などの地球規模の課題を生んできたことも事実である。このような状況にあって、われわれに課せられた課題を解決しながら、持続的社會を構築していくうえで忘れてはならないのが、自然との協調や共存である。

しかし、これまでの人間中心の視座のもとで科学技術を発展させても、その場しのぎの解決

策にしか至らないだろう。なぜなら、課題の発生も解決も同じ土俵、すなわち人間中心で行われているからである。そのような意味において、今後われわれが自然と協調し、共存することで持続的な社会を構築していくためには、人間中心の視座からヒトも自然の一部であるという自然を中心とした視座へと転回し、どのように科学技術を展開させるかを考える必要がある。そのような視座転回の必要性を世界に向けて伝えたかったことから、「From a Nature-Centered Perspective」をサブタイトルとしたのである。

人間中心から自然中心へと視座を移せば、そこには長い進化の過程を経て、自然との相互作用により獲得された生物の知能がある。なかでも全生物種の50%以上を占める昆虫の知能は、自然と協調した課題解決法の宝庫である。われわれが生み出したロジック（科学や技術）だけではなく、自然との相互作用から獲得された昆虫の戦略を学ぶこと、すなわち感覚や脳、行動からそのしくみを学ぶことで、これまでとは異なった側面から自然と協調したものづくりの鍵が提供されるものと思う。

国際昆虫学会議でのプレナリー講演を契機に、昆虫科学の基礎から応用、さらには実用化を目指した研究を紹介し、これまでとは異なる角度から自然との協調・共存を考える科学技術の新しい分野として『昆虫工学』を確立していくため、本書を出版することにした。

## 2 なぜいま、昆虫なのか

昆虫は三対の脚と二対の翅<sup>はね</sup>をもち、からだは頭部と胸部、腹部に分かれる生物と定義される。昆虫の繁栄は、翅による高い移動能力、変態による効率的な資源利用、そして花をもつ植物との共進化が大きな理由であるといわれる。われわれが普段目にする翅のある昆虫が誕生したのは、約5億年前の古生代のデボン紀（約4億1600万年前～約3億5920万年前）である。そして、石炭紀から古生代最後のペルム紀までに現在われわれが知るほとんどの昆虫が出現し、その後、その構造や機能はほぼ変わっていない。地質年代ごとの環境変化による恐竜の絶滅などの事実を考えれば、昆虫の構造と機能が環境変化に対して高い適応性をもっていたことが推測できる。

一方で、昆虫は微小なサイズという、われわれから見れば制限要因とも思われる条件の中で、センサや脳さらには身体を獲得し、適応的な行動を解発するしくみを進化させた。これは、われわれ哺乳類のセンサや複雑な脳とは対照的な設計である。

このような生物（昆虫）がもつ機能、なかでも形状は古くから注目され、まねる（mime）科学（tics）、すなわち生物模倣学（バイオミメティクス、biomimetics）として発展し、工学デザイン、ロボティクス、制御システムへと応用されてきた。

生物模倣学に対して『昆虫工学』では、昆虫をシステムとして捉え、生物機能を分子から神経細胞、神経回路、さらには行動と、昆虫が織りなすしくみをマルチスケールで分析して再現することにより、機能や機構を理解したうえで応用を目指すことに主眼が置かれる。昆虫の優

れた機能の現象面だけに注目した Biologically inspired な活用ではなく、昆虫の機能と機構を基礎からよく理解したうえで活用することが重要となる。

それを可能とする背景として、近年、昆虫の感覚や脳・行動のしくみが、遺伝子工学、電気生理学、行動学、情報科学、ロボット工学などのさまざまな研究手法により分析され、さらには分析結果をモデルとして統合したうえで評価できるようになったことが挙げられる。その結果、昆虫の匂いセンサなどはタンパク質レベルから再現されるようにもなった。また、脳機能のしくみもニューロンや神経回路のレベルから詳細に解明され、全脳をスーパーコンピュータで再現して機能をシミュレーションする研究にまで発展し、従来の生物模倣学をはるかに超えた研究が進められるようになった。

### 3 環（境）世界

環境は物理化学的信号で満たされ、それらは時々刻々と変化する。生物はこのような複雑に変化する環境情報を感覚器により捉えることができる。しかし、生物の種類によって感覚器の種類や性能が違い、捉えることができる環（境）情報も異なる。つまり、生物が検出する情報は、その環境に存在する情報の一部でしかなく、検知した情報も生物によってその価値が異なることになる。

われわれヒトは一見、目や耳、鼻、口、肌などを通して、環境下のすべての情報を得ているように思いがちである。しかし、ヒトの目が見ることのできる光の波長は、400～800 nm の範囲に限られ、波長に応じて短波長から青→緑→赤と感じているに過ぎない。また、音についても同様で、20 Hz～20 kHz の範囲に限られる。これは匂い、味、機械感覚などほかの感覚についても同様である。

一方で昆虫は、ヒトが見ることができない紫外線や偏光を知覚できる。紫外線を知覚できることで、花卉の中央部に色の違いができ、そこに蜜があると瞬時に認識できる。これはネクターガイド（蜜標）といわれる。また、超音波を知覚できることも知られ、コウモリの捕食からの回避などに使用されている。

環境の中には多様な物理化学的信号があるにもかかわらず、われわれを含め生物ごとに知覚できる信号は異なっている。このような生物が知覚できる世界のことを、Uexküll は、彼の著書『生物から見た世界』において「環（境）世界」と呼んでいる。

環（境）世界は、時間の解像度（瞬間）にも及ぶ。ヒトは光の点滅を 40 Hz 程度までは区別できるが、それ以上はつねに光って見える。この頻度を「臨界融合頻度」という。ミツバチの臨界融合頻度は 310 Hz にも達する。ミツバチの羽ばたき頻度は約 250 Hz なので、羽ばたきのストロークも区別できるが、ヒトにはとてもできない。

さらに、もう一つ重要な点はサイズの問題である。体の体積は長さの 3 乗に比例し、表面積は 2 乗に比例する。したがって、サイズが小さくなると体積に対する表面積の比（表面積/体

積)が相対的に大きくなり、摩擦力や粘性力のような面積に関係する力の影響が大きくなる。これを「スケール効果」という。つまり、体が小さくなるに従って摩擦力が相対的に大きくなり、想定した力では動かなくなって、空気も蜂蜜のようにねばねばした状態になる。サイズの小さな昆虫にとっては摩擦を軽減する機構を取り入れることが必須となる。昆虫は、われわれとはまったく異なる力関係の世界で行動しているのである。

このように、われわれヒトから見れば同じ環境であっても、生物種によってその感覚の世界、時間の世界、そして支配する力の世界は異なる。つまり、視座をヒトからほかの生物(昆虫)に転回するだけで、ヒトとは異なる課題解決法が見えてくるわけだ。そこに重要な鍵が隠されている。ほかの生物、特に多様な昆虫へと視座を転回することで、われわれの考えがまだ及ばない解決法を見出すことができる。ヒトという限られた世界の中だけからでは新しい価値を見つけ出すのは難しくても、ほかの生物の世界へと広げていくことによって、新しい価値創造が可能になる。そこに、『昆虫工学』の重要な役割と意味がある。

## 4 昆虫の能力(知能)

昆虫はその感覚器で環境下の情報を捉え、脳神経系による情報処理を介して、身体を駆動して適応的な行動を発現する。昆虫の行動は、単純な反射から定型的行動パターン(fixed action pattern, FAP)、パブロフの犬の条件反射の実験で有名な古典的条件づけにまで至る。さらに驚くべきことには、顔認識や個体識別などの高度な認知行動までも示す。餌を求めて摂食する採餌行動はよく見かけますが、味覚はもちろん、嗅覚、視覚、機械感覚などさまざまなモダリティの感覚情報が適切に処理されることで、初めて可能となる行動である。

また、現在の科学技術でもまだ解決に至っていない課題を解いてもいる。例えば、オスのガが空中に漂うフェロモンの匂いを頼りに、遠く離れたメスのパートナーを探索するのはよい例である。特定の匂いの検知やその探索は、現在の工学でも難問であり、まだその実用化には至っていない。昆虫は、このような課題を、昆虫の環(境)世界に潜む信号刺激やその処理により解決している。昆虫は課題解決法の宝庫であり、そこにはヒトが到達し得ない解決法のヒントが潜んでいる。

昆虫の小さなサイズもまた、さまざまな特徴を生むことになる。サイズが小さくなるほど体積に対して表面積の比(表面積/体積)が相対的に大きくなる。これを「スケール効果」ということは前述したが、この効果により体表面に多くの感覚器を配置できる。昆虫はその脳を構成する神経細胞数(10~100万個)と同じオーダーの数の感覚器(嗅覚:10万、視覚:50万)を体中に張り巡らしている。これに対して哺乳動物では、感覚器の数(嗅覚:600万、視覚:1.2億)は脳を構成するニューロン数(1000億)の1%にも満たないのである。

このような特徴から、昆虫の感覚情報処理は感覚器に重点が置かれ、小さな脳の負荷を減らすことができる。広範にセンシングして巨大な脳の処理に頼る哺乳類とは情報処理のしくみが

異なる。ガのフェロモンの匂いを検出する感覚器が、フェロモンにしか応答しない「スペシャリスト」であるのはよい例である。このような昆虫のセンサの特徴は、高感度高選択性のセンサとして再現して活用するにはうってつけなのである。

また、サイズが小さくなると飛行や遊泳、歩行に必要な制御系にも違いが出てくる。制御系の応答は $1/L$  ( $L$ はサイズ)の割合で速くなることが要求される。これは水に浮かべた小さな船が異様に速く揺らいでいることからわかるだろう。したがって、昆虫のような小さなサイズの生物の制御系では制御の遅れを生じないように、情報処理に関わる脳(神経節)が頭部、胸部、腹部に分散する分散脳という神経系を獲得し、機能を分散することで速い処理に対応しているのである。

昆虫がもつわれわれの想像を超えた環境への適応の背景にはさまざまなしくみが潜んでいる。そのしくみを知ることは、昆虫の生きるしくみを知るうえで重要であるばかりか、そのしくみをセンサや機械システムなど工学に生かすことで、われわれの直感や思考を超えた新しい価値を創造するうえでも重要となる。

## 5 本書の構成

本書は、地球上で最も繁栄し、小型・軽量・低コストの情報処理装置の傑作である昆虫について、その基礎研究から応用、社会実装の現状をわが国の代表的な研究者に執筆いただき、『昆虫工学』としてまとめて紹介するものである。

本書は2部構成になっており、各部は章で構成される。第1部は「基礎編」で、昆虫の行動、中枢処理、センサの3章からなる。各章は関係分野の研究者に執筆いただき、第1章は櫻井健志、第2章は並木重宏、第3章は光野秀文が編著者としてとりまとめた。第2部は「応用編」で4章からなり、祐川侑司がとりまとめた。各章の内容や本著全体での位置づけは、各編著者がそれぞれの執筆箇所で紹介している。

『昆虫工学』では、生物機能を分子から神経細胞、神経回路、さらには行動のさまざまな階層からシステムとして捉え、それを再現することで理解し、応用することに主眼が置かれる。第1部に「基礎編」を置いたのはそのような理由による。昆虫の優れた機能の現象面だけに注目した応用ではなく、昆虫の機能と機構を基礎から理解したうえでの活用を目指している。

昆虫の行動に関する第1章では、昆虫の進化的起源についても解説され、環境との相互作用により獲得された昆虫の適応的行動、ナビゲーション戦略や、昆虫の繁栄のきっかけとなった飛翔行動、さらには社会的相互作用についても相利共生から解説されている。

中枢処理に関する第2章では、昆虫の微小脳の進化から感覚情報処理、行動制御のしくみについて具体的な事例を挙げながら紹介している。また、昆虫の歩行制御や概日リズム、さらには睡眠についての最新の知見も示されている。

昆虫の感覚に関する第3章では、視覚、聴覚、機械感覚、温度感覚、嗅覚、味覚に焦点を当

て、それらのセンサ（感覚器）の構造や機能が解説されている。

第2部は「応用編」として、昆虫の感覚器によるセンシングと神経系での情報処理、それに基づく行動など、昆虫のもつ機能の工学や農学への応用について紹介されている。昆虫の振動感覚を利用した害虫防除などの農学応用、嗅覚受容体を利用した匂いセンサ開発、羽ばたきロボット、群知能ロボットやナビゲーションロボットの開発に至る研究が挙げられている。

なかでも昆虫自体を遠隔操作する「昆虫ハイブリッドロボット」は、昆虫の飛行機能などを直接利用したユニークな研究であり、近年研究が長足の進歩を遂げ、被災地での要救護者の捜索に向けた実用研究へと展開している。また、昆虫の脳機能を神経細胞から再構築することで探究する昆虫全脳シミュレーションは、わが国のフラッグシップスーパーコンピュータである「富岳」を用いた研究であり、全脳のリアルタイムシミュレーションの実現を目指した研究である。さらに、現代の工学技術だけでは困難な課題を昆虫を活用して解決を図る例として、超高度の匂いセンサを昆虫の嗅覚受容体から再現する技術も紹介されている。

昆虫の機能や機構を精緻に分析し再現できるようになった背景には、研究手法の飛躍的な進歩がある。そこで、本書ではその代表となる電気生理学や遺伝子工学の技術、そして昆虫の機能を分析するロボット技術についてもコラムを設けて解説することにした。

われわれヒトの発想や原理に基づいたものづくりはもちろん重要であるが、ヒトよりはるか以前から地球に生息し100万種もの多様な種として発展を遂げた昆虫の視座での発想や、そこで機能する原理に基づいた『昆虫工学』は、今後必要となる自然と協調し共存しながら課題

表 本書で扱う項目と項目間の関係（○.○は節番号を表す）

感 覚	中枢処理	行 動	応 用
視覚（複眼、色覚） 2.2, 3.2, 5.1	視覚（オプティックフロー、 像・標的検出） 2.2, 2.4, 3.2, 6.1	飛翔・ジャンプ 1.3, 1.4, 6.2, 7.1	農業応用・総合的害虫管理 3.2, 3.3, 5.1
化学感覚（嗅覚、味覚、フェ ロモン） 2.3, 3.4, 3.5, 5.2, 7.2, 7.3	嗅覚・フェロモン（識別、パ ターン分離・連合学習） 2.3, 2.5, 3.5, 6.1	歩行 2.4, 6.2	匂いバイオセンサ 2.3, 5.2 外骨格バイオマテリアル 1.2
聴覚・振動（弦音器官）・気 流感覚 1.5, 3.3, 5.1	歩行・羽ばたき・ナビゲーシ ョン（リングアトラクタ、中枢パ ターン発生器、巨大介在神経） 1.3, 1.5, 2.4	逃避・回避・ナビゲー ション 1.5, 2.4, 6.2, 7.3	昆虫全脳シミュレーション 2.2, 2.3, 2.5, 6.1
温度感覚 3.6	内部状態・自発活動・概日リス ム・睡眠 1.6, 2.5, 6.1	社会的相互作用・共生 1.4, 1.6, 7.2	昆虫ハイブリッドロボット ① 昆虫サイボーグ 1.3, 6.2 ② 匂い源探索ロボット 1.5, 7.3
系統進化・外骨格（クチャラ） 1.2	社会的学習・秩序化 1.4, 1.6, 7.2	適応的行動調節 1.3, 1.4, 1.6, 3.5, 7.1	昆虫規範型ロボット ① 羽ばたきロボット 1.3, 7.1 ② 群制御ロボット 1.4, 1.6, 2.5, 7.2

を解決する科学技術の新しい道を拓いていくものと思う。

最後に本書をご覧いただくにあたり、第1部基礎編、そして第2部応用編で扱う項目と項目間の関係を示した表を作成したので、興味ある内容から読み進めてもらいたい。関連する項目を参考とすることで、より深く昆虫、そして『昆虫工学』の面白みがわかっただけのものと思う。

2026年5月

監著者 神崎 亮平

# 目 次

## 第1部 基礎編

### 第1章 行 動

1.1 昆虫の多様な行動	1
1.2 昆虫の進化的起源の探索	3
1.2.1 外骨格を通して昆虫について考える	3
1.2.2 昆虫の一般的な分類	4
1.2.3 昆虫が独自に獲得した外骨格硬化のしくみ	7
1.2.4 外骨格構造の進化と応用	10
1.2.5 昆虫外骨格の応用に向けて	11
1.3 飛翔行動の神経・筋・骨格メカニズム	11
1.3.1 昆虫の飛行に学ぶ	11
1.3.2 飛翔筋の構造と機能	12
1.3.3 羽ばたき運動を生み出す神経メカニズム	16
1.3.4 昆虫飛行の統合的理解に向けて	18
1.4 環境知覚と適応的行動	19
1.4.1 環境の知覚	19
1.4.2 内部状態に応じた行動の発現	20
1.4.3 身体構造と適応行動の発現	23
1.4.4 人工物の設計と制御に向けて	25
1.5 昆虫のナビゲーション戦略と指向性逃避行動の状況依存的制御	26
1.5.1 はじめに：昆虫の移動について	26
1.5.2 昆虫の多様なナビゲーション戦略	26
1.5.3 指向性逃避行動の状況依存的制御	29
1.6 好蟻性昆虫によるアリ社会への統合戦略	34
1.6.1 アリの社会	35
1.6.2 好蟻性昆虫	35
1.6.3 栄養報酬	36
1.6.4 学習と認知	36
1.6.5 化学擬態	38

1.6.6 行動操作	39
1.6.7 好蟻性昆虫によるアリの認識	40
1.6.8 アリ社会への統合戦略に関する今後の展望	40
引用・参考文献	41

## 第2章 中枢処理

2.1 昆虫脳の情報処理機構	47
2.2 視覚情報の情報処理機構	49
2.2.1 昆虫の視覚が生み出す行動	49
2.2.2 視覚信号の流れと視覚神経回路	50
2.2.3 眼の空間分解能と感度	51
2.2.4 色の情報処理	53
2.2.5 動きの情報処理	55
2.2.6 昆虫に学ぶ信号抽出のしくみ	57
2.3 嗅覚系高次中枢の情報処理	57
2.3.1 末梢：匂い分子の受容	58
2.3.2 一次中枢：応答の調節	59
2.3.3 高次中枢：応答パターンの分離	60
2.3.4 匂いの「価値」に基づく行動選択	62
2.3.5 もう一つの嗅覚系高次中枢	65
2.3.6 昆虫嗅覚研究の今後	65
2.4 歩行運動と探索行動を制御する脳機能	66
2.4.1 昆虫を用いた歩行運動制御の理解	66
2.4.2 ショウジョウバエを用いた脳研究の魅力	66
2.4.3 昆虫脳を中心複合体の探索行動における機能	68
2.4.4 昆虫脳の視覚回路による歩行・飛行軌道制御	71
2.4.5 歩行運動制御のさらなる理解と応用	74
2.5 神経回路の自発活動パターンとその機能的役割	74
2.5.1 自発活動パターンとは	74
2.5.2 発達段階における自発活動パターンの機能性	77
2.5.3 感覚系の神経回路の自発活動パターン	79
2.5.4 内部状態モニタリングとしての自発活動パターン	79
2.5.5 自発活動パターンの昆虫工学的応用に関する今後の展望	81
引用・参考文献	82

### 第3章 昆虫のセンサ（感覚器）の構造と機能

3.1 センサ（感覚器）の多様性と応用	88
3.1.1 センサの多様性	88
3.1.2 感覚器・機能の活用例	89
3.1.3 本章について	90
3.2 昆虫の光受容と視覚情報処理（視覚・色覚）	91
3.2.1 複眼の構造と光適応	91
3.2.2 個眼の視細胞構成とその機能	93
3.2.3 色覚の神経機構	96
3.3 昆虫の振動・聴覚器の構造と機能	98
3.3.1 振動・聴覚を司る共通のセンサ	98
3.3.2 弦音器官の基本構造	99
3.3.3 振動・聴覚器の進化	101
3.3.4 振動受容器	101
3.3.5 聴覚器	104
3.3.6 弦音器官の周波数フィルタリングと増幅	107
3.3.7 生物工学への応用と今後の展望	109
3.4 昆虫の嗅覚・味覚の受容体構造と機能	109
3.4.1 昆虫における環境中の化学物質の役割	109
3.4.2 体外の物質を検知する化学感覚器	110
3.4.3 化学感覚器で機能する受容体ファミリーとその発現	111
3.4.4 化学感覚受容体の機能	113
3.4.5 嗅覚および味覚受容体の立体構造	114
3.4.6 生物機能を工学利用するうえでの、今後の昆虫嗅覚研究の課題	115
3.5 昆虫のフェロモン受容機能と情報処理	116
3.5.1 ガとゴキブリの性フェロモン	116
3.5.2 性フェロモンの受容機構	117
3.5.3 一次嗅覚中枢触角葉の性的二型	120
3.5.4 ガとゴキブリの大糸球体における性フェロモン情報処理機構	121
3.5.5 まとめ：飛翔昆虫と歩行昆虫のフェロモン情報処理戦略	123
3.6 温度受容や刺激受容を生み出すしくみ	125
3.6.1 昆虫での温度受容研究	125
3.6.2 ハエの温度センサの種類	125
3.6.3 TRP チャンネルを介した温度受容	126
3.6.4 GR を介した温度受容（高温センサ）	128
3.6.5 IR を介した温度受容（高温・低温センサ）	128
3.6.6 GPCR を介した温度受容	129

3.6.7 Anoctamin を介した温度応答の増強	129
3.6.8 その他の昆虫がもつ温度センサと温度受容	129
3.6.9 温度センサの温度応答機構	130
3.6.10 環境問題と工学的応用に向けた今後の展望	131
引用・参考文献	132

## 第2部 応用編

### 第4章 昆虫機能の工学応用

引用・参考文献	142
---------	-----

### 第5章 昆虫のセンサに関わる工学応用

5.1 感覚機能の農業応用（感覚応用）	143
5.1.1 害虫防除と感覚機能	143
5.1.2 振動を利用した害虫防除	144
5.1.3 光を利用した害虫防除	147
5.1.4 感覚機能を応用した害虫防除の展望	149
5.2 匂いバイオセンシングシステム	150
5.2.1 生物のしぐみを利用した匂いセンサ	150
5.2.2 センサのしぐみ	150
5.2.3 液相匂いバイオセンサシステム	152
5.2.4 気相匂いバイオセンサシステム	155
5.2.5 昆虫のしぐみを利用した匂いセンサのまとめ	158
引用・参考文献	158

### 第6章 昆虫の中枢処理に関わる工学応用

6.1 昆虫神経系大規模シミュレーションの基礎とその展望	161
6.1.1 はじめに	161
6.1.2 神経細胞と細胞モデル	162
6.1.3 フィードフォワードネットワークと昆虫脳	163
6.1.4 再帰的なネットワークと昆虫局所回路	165
6.1.5 昆虫のシミュレーションの例	166
6.1.6 展望：並行する高次機能と全脳シミュレーション	168
6.1.7 結語	170

6.2 昆虫ハイブリッドロボット	171
6.2.1 研究開発動向	172
6.2.2 研究開発例	175
6.2.3 最後に	179
引用・参考文献	181

## 第7章 昆虫の行動に関わる工学応用

7.1 羽ばたきロボット	184
7.1.1 飛行ロボットの基礎設計	185
7.1.2 要素設計について	186
7.1.3 羽ばたきロボットの例	189
7.1.4 飛翔生物の行動に関わる羽ばたきロボットの課題と展望	192
7.2 群知能アルゴリズム	192
7.2.1 昆虫と群知能	192
7.2.2 間接的相互作用による秩序形成	193
7.2.3 解探索への応用：Ant Colony Optimization	195
7.2.4 活動状態の自己組織的調整	197
7.2.5 生物の実践的行動の応用可能性	199
7.3 昆虫の行動戦略を模倣した嗅覚ナビゲーションロボット	199
7.3.1 嗅覚ナビゲーションの背景	199
7.3.2 地上走行型ロボットによる嗅覚ナビゲーション	201
7.3.3 ドローンを用いた3次元嗅覚ナビゲーション	205
7.3.4 嗅覚ナビゲーションの展望	208
引用・参考文献	209

## コ ラ ム

コラム1 電気生理学的計測手法	212
コラム2 昆虫の脳と行動を調べるロボット技術	214
コラム3 遺伝子組換えとゲノム編集	216
引用・参考文献	218

あとがき：昆虫工学が拓く新しい価値創造	220
---------------------	-----

索引	223
----	-----

## 第1章

## 行動

### 1.1

### 昆虫の多様な行動

昆虫は地球上で最も繁栄した動物群であり、これまでに同定されている種数だけでも100万種を超え、さらに未記載種を含めれば数百万種規模に達すると推定されている。また、昆虫は海を除く地球上のあらゆる地域に生息しており、その繁栄ぶりから地球は「昆虫の惑星」といわれるほどである。これには、昆虫が飛行能力を獲得し、高い移動能力を得たことが大きな要因であると同時に、多様なニッチの中で生存・繁殖を果たすためにそれぞれの環境に適応した多様な行動を進化の過程で獲得してきたことが重要な要因となっている。

動物の行動は、環境中の刺激が感覚器により受容され、その情報が脳で処理されて最終的に運動系へ伝達されることで発現する。昆虫の脳はサイズが小さく比較的単純な構造であるため、しばしば反射のような単純な行動しかできないと誤解されるが、実際は反射行動から生得的な定型的行動、記憶学習による行動、さらには群・社会行動に至るまで多様な行動を示す。そのため、昆虫の行動は「限られた神経系でいかに環境に適応的な行動が実現されているか」を理解するための有力なモデルであり、動物一般に共通する適応的な行動の発現メカニズムや行動戦略を明らかにするための格好の材料として研究が進められている。このような神経行動学的な重要性に加えて、本書のテーマである工学的な応用の観点からも昆虫の行動の理解は重要である。例えば、上述のとおり昆虫は限られた計算リソースで高度な行動を発現しているため、昆虫の行動発現の原理や制御メカニズムを理解することで、小型で省エネルギーでありながら高い環境適応性をもつロボットや人工知能システムの開発に資することが期待されている。さらに、昆虫はそれぞれのニッチに適応するための行動戦略を進化させてきた。そのため、既存の工学的アプローチでは解決が難しい課題に対しても、昆虫の行動戦略に学ぶことで新しい解決方法を提示できる可能性がある。

そこで、本章では昆虫の行動をさまざまな観点から解説し、それぞれの行動のベースとなるメカニズムをまとめた五つのトピックを提供する。また、それぞれのトピックにおいて、可能

な限り工学的な応用へのつながりについても触れているため、第2部への導入として読んでいただければ幸いである。以下、本章で取り上げる五つの節について簡単に紹介する。

本章で対象とする「行動」を含めて、生物学的にも工学的な応用の観点においても昆虫を研究するうえでのキーワードはさまざまな環境への適応性であり、それを可能にしている多様性である。すなわち、昆虫の応用を考えるうえで、昆虫の進化的な位置づけやその後の多様化の過程はさきわめて重要な点となる。そこで、1.2節では、まず昆虫の進化的起源および多様化と環境適応に関して解説したうえで、昆虫の繁栄を支えているしくみの一つと考えられる外骨格形成について述べられる。外骨格は昆虫の属する節足動物に共通する身体的特徴の一つである。1.2節では特に、昆虫が陸上に進出する過程で独自に獲得した、カルシウムに代わり空气中に豊富な酸素分子を利用した外骨格硬化メカニズムについて紹介される。昆虫の外骨格は軽さと丈夫さを兼ね備えており、バイオマテリアルとしての応用が期待されるのに加えて、これらの特性は1.3節で述べられる昆虫の飛翔行動にも重要な役割を果たしている。

冒頭でも述べたように、昆虫の繁栄の大きな要因の一つが飛翔行動である。飛翔によって昆虫は生息域を拡大させ、食資源の探索、配偶相手の発見、天敵からの回避など多様な課題を解決してきた。昆虫は通常二対、ハエ目では一対の翅<sup>はね</sup>の羽ばたき運動により、ホバリング、滑空、旋回、直線飛行など多彩な飛翔パターンを実現している。1.3節では、このような飛翔行動を可能にする神経・筋肉のメカニズムに関する最新の知見が述べられる。また、近年研究が進められている、飛翔における筋や外骨格の役割についても紹介される。昆虫の飛翔は羽ばたき運動を模倣した小型で安定的な飛行ロボットの開発や、飛翔筋の活動の人為的操作によって昆虫の飛行をコントロールした昆虫ハイブリッドロボットの開発などの工学応用も進んでいる領域である。工学応用の現状については、第2部の6.2節、7.1節を参照されたい。

昆虫は時々刻々と変化する環境の中で、環境中の刺激を受容、知覚し、その情報を脳で処理することで状況に応じて柔軟な行動を示す。このような予測困難な状況下で昆虫が適応的な行動を発現するしくみは、新たなロボットの制御法の開発という観点から、工学の分野においても重要なトピックとなっている。1.4節では、それぞれの生物が独自にもつ知覚世界である「環世界」の解説から、昆虫が知覚している世界を概観する。そして、知覚した情報から適応的行動を発現するしくみについて、アリやコオロギの個体の内部状態に応じた行動発現の調節を例に述べられている。また、ミツバチの飛翔時の羽ばたき、バッタのジャンプの研究事例から、外骨格や筋肉といった昆虫に特徴的な身体的構造（1.2節、1.3節参照）の適応的行動への寄与についても述べられている。

いまいる地点から目標とする地点まで移動する行動をナビゲーションという。飛翔をはじめとする昆虫の高い移動能力にナビゲーション能力が加わることで、餌や配偶相手の探索、敵からの逃避といった適応的な行動が実現する。1.5節では、昆虫の代表的なナビゲーション戦略について概要が紹介される。さらに、気流により誘導されるコオロギの逃避行動を例に、逃避行動のナビゲーションの目標方向の設定や、運動制御のメカニズムの詳細が述べられている。

このような昆虫のナビゲーションは、ナビゲーションロボットを開発するうえでの新しい設計指針を与えるものとして工学応用が期待されている。その一例として、昆虫の匂い源定位行動を模倣した嗅覚ナビゲーションロボット開発について第2部の7.3節で述べられているので、あわせて参照されたい。

1.5節まではおもに単独の個体に着目して、環境の刺激や内部状態に応じて発現する行動を取り上げる。一方で、アリやミツバチなどの社会性昆虫では、個体の行動は自律的に決定されるのではなく群れや他個体との相互作用によって柔軟に変化し、そのような相互作用によって集団としての新たな秩序や機能が生み出される。1.6節では、高度に秩序化されたアリの社会に入り込み、資源や保護を得るために多様な行動を進化させてきた好蟻性昆虫の統合戦略について紹介される。これらの戦略は、アリ社会という閉じた社会システムにいかにして外部の生物が入り込み、資源利用や生存戦略を確立するかを示す典型的な事例である。そのため、好蟻性昆虫の研究は、社会性昆虫の認知メカニズムや行動の柔軟性を理解する手がかりとなるだけでなく、共生進化や生態系における相互作用を通じて発現する適応的行動や、そのメカニズムの解明においても重要である。個体が周囲の環境情報や他個体との相互作用に基づいて自らの行動を調整するメカニズムは、第2部の7.2節で紹介する群ロボットの協調行動や制御アルゴリズムの指針となっている。

これら各節は一見すると独立したトピックのようにも見えるが、根底には共通する問題意識がある。それは「環境から得られる情報が神経系によってどのように処理され、適応的な行動として表れるのか」という問いである。したがって本章全体が、個別の研究例を超えて、昆虫の行動に関する読者の理解を体系的に深める一助となれば幸いである。 (櫻井健志)

## 1.2

## 昆虫の進化的起源の探索

### 1.2.1 外骨格を通して昆虫について考える

昆虫は地上で最も繁栄（成功）している動物ともいわれている。事実、記載種だけでも100万種を超えるなど非常に多様で、かつ適応力も高く陸上のあらゆる環境に生息している。昆虫の圧倒的な繁栄の理由を考えると、変態・休眠や社会性など、昆虫なりに進化させてきたしくみが興味深い。昆虫がどのように進化・誕生したのかについては、すでにさまざまな論文・書籍等で語られているが、本節では昆虫が属する節足動物に共通した身体的な特徴の一つである「**外骨格** (exoskeleton) (または**クチクラ**, cuticle)」に注目した解説をする。ただし、その前段階として、まず多細胞動物全体、または節足動物全体の中で、昆虫がどのような進化的な位置に存在するのかについて触れつつ、昆虫の誕生に至る進化の歴史について説明する。

本書の主旨として、「昆虫で学んだことの実用的応用」の視点が重要だと思われる。例えば、昆虫がもつ外骨格は「軽くて丈夫」であることがよく議論されている。そのため、昆虫外骨格の研究を進めることで、「未来の新規マテリアル開発」のヒントが得られるかもしれない。ま

た、昆虫外骨格を模した新規マテリアルが実際にあったとして、それは単に物性上優れているだけでなく、製造や廃棄の段階でも利点があると想像できる。つまり、生物由来の原料を用いることで化石資源の使用を減らしながら、廃棄の際も（外骨格に似た物質なので）環境負担が抑えられる。現代社会が抱える問題解決に直接貢献できる可能性がある点において、昆虫外骨格は非常に魅力的かつ将来性のある研究対象ではないかと考えられる。

### 1.2.2 昆虫の一般的な分類

〔1〕 動物の分類における節足動物の位置づけ 昆虫は節足動物に属しており、当然ながら節足動物特有の体構造をもつ。ちなみに節足動物「arthropod」の語源は「arthron（関節）+ podos（脚）」という、脚に見られる特徴的な構造から来ている<sup>1)†</sup>。現生の節足動物門は一般的に四つの亜門（**鋏角類** (*Chelicerata*), **多足類** (*Myriapoda*), **甲殻類** (*Crustacea*), **昆虫類** (*Insecta*) (または六脚類, *Hexapoda*)) から構成されるとされている。どの分類群も、“arthropod”にふさわしい「節」に分かれた脚をもっている。われわれヒトのような内骨格をもつ動物の脚にも関節はあるものの、節足動物は<sup>よろい</sup>鎧のようなパーツ（外骨格）が露出して、「メカメカしい」形態、または節と節の間にある境目が明瞭に見てとれる。

昆虫の進化学的位置について議論する前に、まず高次分類群である節足動物について考えてみる。今世紀に入って以降、遺伝子配列の相同性に基づく新しい系統分類が進み、それまで形態学・発生学・解剖学的な観察で導き出された分類に大きな変革が生じている。その結果として、無脊椎動物の分類にはかなり大きな改変・刷新がなされており、現状、大まかな分類において前口動物は大きく二つに分けられることになった（**図 1.1**）<sup>2)</sup>。

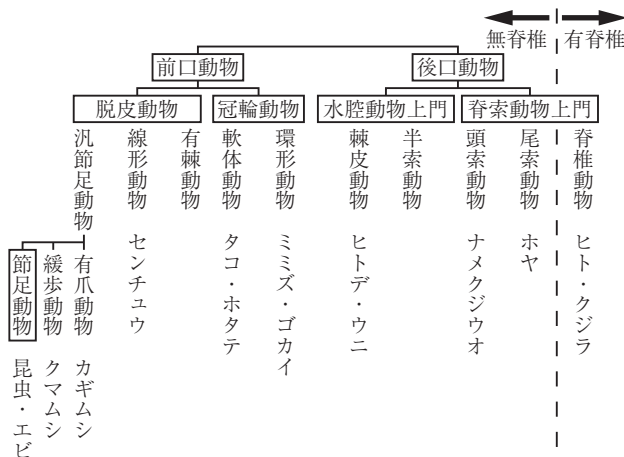


図 1.1 多細胞生物（左右対称動物）の大まかな系統分類。文献 1) の図から一部を抽出し、日本語の専門用語で補った。一番左に、昆虫が属する節足動物を配置してある。

† 肩付き数字は、章末の引用・参考文献の番号を表す。

一つは冠輪動物 (*Lophotrochozoa*) と呼ばれるもので、ミミズ・ゴカイ (環形動物) やタコ・ホタテ (軟体動物) を含む。もう一つは脱皮動物 (*Ecdysozoa*) と呼ばれ、節足動物のほかには、耐久性の高さで有名なクマムシ (緩歩動物) や、外見上は節足動物とは大きく異なるセンチュウ (線形動物)、アノマロカリスに外見が若干似ているカギムシ (有爪動物) などが含まれる。脱皮動物はその名のとおり、脱皮を繰り返して成長する。

節足動物は体躯の前後軸に沿って作られる明確な分節構造があり、また体節ごとに付属肢がある、という基本構造をもつ。かつては節足動物に分類されていた四つの亜門のうち、すべてが共通の祖先から進化したのではなく、一部はまったく別系統から<sup>しゅうれん</sup>収斂的に類似した形態をとるように進化してきたのではないかと議論されてきた<sup>3)</sup>。しかし、遺伝子配列を用いた分類学が発達した後は、結局、節足動物は単系統であることが支持されている<sup>4)</sup>。

「節足動物としての特徴が複数系統で独立に進化した」といった興味深い仮説に関する議論は、配列情報が主たる判断基準になって以降、完全に否定された。かつては形態的特徴が主たる判断基準であったため、「目に見えるものに捉われず、あらゆる可能性を否定しない」議論がなされていた時代であったがゆえの事例といえる。古典的な形態学的視点から、昆虫もかつてはムカデ・ヤスデなどが属する多足類に近縁だと考えられていた<sup>3)・4)</sup>。しかし、配列情報の利用が一般化してからは、昆虫は一部の甲殻類から進化したという理論が定説化している<sup>4)・5)</sup>。

〔2〕 陸上における昆虫の出現とその後の多様化 比較的最近 (1980 年代) になって初めて見つかった分類群で、ムカデエビと呼ばれる海水棲の甲殻類が、昆虫にかなり近い節足動物として注目されるようになった。〔1〕で触れたが、甲殻類と昆虫が近縁だとする考えが広まったのも遺伝子塩基配列の情報が蓄積したことによる。こうした議論は、90 年代の終盤から 2026 年現在に至るまで盛んに交わされてきた。当初、おもに淡水に生息するミジンコ類が昆虫と最も近縁だったとする説もあった。しかし、ムカデエビ由来の塩基配列が調べられるようになって以降、昆虫を含む六脚類とムカデエビが姉妹群であるとの考えが現在一般的である<sup>4)・5)</sup>。ムカデエビ類との共通祖先から分岐した昆虫の祖先は、まず進化の過程で上陸し、かつ 6 本脚をもつようになって「六脚類」となり、この六脚類の系統から、さらに進化が進んで昆虫が誕生したと考えられる (図 1.2)。

現在、正式な分類学において昆虫は外顎類 (*Ectognatha*) とも呼ばれている。一方、昆虫に類似するものの昆虫には含まれない非昆虫六脚類 (non-insect hexapods) という呼び名でくられる分類群がある。非昆虫六脚類にはトビムシ、カマアシムシ、コムシが知られており、これらは<sup>ないがくろい</sup>内顎類 (*Entognatha*) とも呼ばれている。昆虫は外顎類の名のとおり大顎が頭部の外側に位置し、内顎類は大顎が頭部に収納されているが、これは祖先的形質だと考えられている<sup>6)</sup>。内顎類ではそのほかにも、内部形態や、胚発生時に形成される耐乾燥構造などに原始的な特徴が認められる<sup>7)</sup>。真性の昆虫においても、イシノミ、シミなど、翅をもつに至らない段階では原始的といえる外観 (主観的ではあるものの) が特徴的である。しかし、翅を獲得し飛

# 索 引

## 【あ行】

アクチン繊維	24
イオントロピック受容体	111,126
イオンチャネル	113
威嚇行動	21
一酸化窒素	23
インターロセプション	76
運動制御	24
運動中枢	16
運動パターン	16
栄養交換行動	37
オクトパミン	21
音刺激の到達時間差	27
オペティックフロー	29,55,71
温度遺伝学	90

## 【か行】

外温動物	125
外骨格	3
外側膝状体	51
回転駆動型	186
回避行動	21
化学擬態	38
学 習	36
カースト	35
滑降シンプレックス法	154
活動電位	24,212
カルシウムイオン感受性	
蛍光タンパク質	151
カルシウムイメージング法	66
感覚器	88
感覚子	117
感覚フィードバック	16
感覚毛	99
感桿分体	50
環境中心座標	70
環世界	20
間接筋	13
間接的相互作用	192
キイロショウジョウバエ	66
寄生的	35
基底膜	53
キノコ体	60
—の出力神経	63
揮発性有機化合物	110

求愛行動	22
嗅覚受容細胞	58,110
嗅覚受容体	58,111
嗅覚受容体共役受容体	111
脅 威	20
鉞角類	4
行商人問題	195
経上皮膜電位	213
共生関係	34
胸部神経節	16
局所介在神経	60
局所場電位	213
巨大介在ニューロン	34
筋小胞体	24
グアニル酸シクラーゼ	23
空間的加重	53
空気力	187
クチクラ	3
屈曲筋	24
駆動部	186
組み合わせ最適化	195
クライオ電子顕微鏡法	114
クラス NP	195
群知能	192
脛 節	24
警報フェロモン	39
経路積算	29
経路積分	73
ケニオン細胞	60
弦音器官	99
広域選択性	150
光学式匂いバイオセンサ	154
甲殻類	4
好蟻性	35
光 子	51
高速液体クロマトグラフィー法	21
行動制御	145
個 眼	91
鼓膜器官	105
コロニー	35
混合臭濃度定量	153
痕 跡	193
昆虫類	4

## 【さ行】

細胞センサ	89
-------	----

視 覚	143
視覚中枢	50
糸球体	59,120
視交叉上核	80
自己受容器	16,99
自己組織的調整	193
自己中心座標	70
視細胞	92
視小葉	50
視小葉板	50
視小葉複合体	50
視 髄	50
膝下器官	101
自発活動	74
社会性昆虫	20
社会的学習	38
視野再現構造	51
受信者操作特性曲線	79
受容器電位	213
視 葉	50
鐘状感覚子	99
上昇状態	75
視葉板	50
小 面	50
触角センサ	89
触角葉	59
触角葉局所介在ニューロン	121
触角葉投射ニューロン	121
徐波活動	75
ジョンストン器官	104
神経系	11
神経修飾物質	23
神経重複	53
神経伝達物質	24
神経ホルモン	23
人工複眼カメラ	89
伸展筋	24
振動感覚	143
振動発生装置	145
水晶振動子センサアレイ	154
スクレロティゼーション	8
巢仲間識別能力	38
スパイクタイミング依存型可塑性	77
スパス・コーディング	62
制御トルク	187

生殖分業	20	デュアルオキシデース	10	非同期筋	14
生体アミン	21	電気生理学的計測手法	212	一人勝ち状態	197
精緻化	75	電磁弁	156	尾葉	30
性フェロモン	116	伝導	131	尾翼	187
生物振動学	147	同期筋	14	フィードフォワード制御	31
セロトニン	21	投射神経	59	複眼	91
線形判別分析法	152	闘争行動	21	物質使用障害	80
センサアレイ	150	頭方位	68	物理的防除	143
走光性	147	トップダウン	185	分光特性	94
総合的害虫管理	146	ドーパミン	21,40	偏光感度	94
操縦筋	14	ドーパミン作動性神経	64	放射	131
相利共生	35	トロポニン	24	牧畜	36
側角	65	トロポミオシン	24	歩行	66
				ボトムアップ	185

## 【た行】

大糸球体	120
腿節	24
腿節内弦音器官	101
大単極細胞	53
体表炭化水素	36
体表フェロモン	22
対流	131
多感覚情報	39
多足類	4
多様性	88
単一感覚子記録法	213
探索行動	68
短波長	54
知覚	19
チャンネルロドプシン	66
中心複合体	27,66
中枢神経系	19
中枢パターン発生器	17
中波長	54
超個体システム	197
長波長	54
重複像眼	51,92
直接筋	12
直線駆動型	186

## 【な行】

内転筋	25
内部状態	20
宥め物質	39
ナビゲーション	26
匂い活性型イオンチャンネル	113
匂いセンサ	150
匂いバイオセンサ	150
脳	16
能動センシング法	153

## 【は行】

バイオミネラリゼーション	8
バイオミメティクス	11
はしご状神経系	16
パターン認識	151
パターン分離	61
波長選好性	147
パッチクランプ法	66
翅	11
パワー筋	14
反射	17
飛翔筋	11,24
飛翔生物	184
非同期型飛翔筋	24

## 【ま行】

マイクロディスプレイ	154
負け効果	22
マハラノビス汎距離	153
味覚受容細胞	111
味覚受容体	111,126
蜜	35
メタヒューリスティクス	193
毛状感覚子	30
網膜電図法	148
目標方位	69
モスアイ構造	89

## 【ら行】

ラッチ	24
リガンド結合性 OR	118
両耳間の音圧差	27
リリーサーフェロモン	20
臨界期	75
リングアトラクタモデル	68
レイノルズ数	26
連合学習	62
連立像眼	51,92
ロックイン計測	152

## 【英字】

AlphaFold 3	115
Ant Colony Optimization	192
CHCs	36
Collective Sorting	194
CX	27
DA	21
GAL4-UAS システム	66
GCaMP	66
GFP	66

GIs	34
GTP 結合タンパク質共役型受容体	125
G タンパク質	113
Hough 変換	152
ILD	27
ITD	27
LFP	213
NO	23
OA	21
Orco	151

S/N 比	212
Sf21 細胞	151
transient receptor potential	125
TTEMSS 規則	27
Umwelt	20

## 【数字】

5HT	21
7 回膜貫通構造	113

— 監著者・編著者略歴 —

神崎 亮平 (かんだき りょうへい)

1986年 筑波大学大学院生物科学研究科博士後期課程修了(生物物理化学専攻), 理学博士

2023年 東京大学名誉教授

現在, 東京大学先端科学技術研究センターシニアリサーチフェロー

櫻井 健志 (さくらい たけし)

2005年 京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了(応用生物科学専攻), 博士(農学)

現在, 東京農業大学教授

並木 重宏 (なみき しげひろ)

2009年 筑波大学大学院生命環境科学研究科博士後期課程修了(情報生物科学専攻), 博士(理学)

現在, 東京大学准教授

光野 秀文 (みつの ひでふみ)

2009年 京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了(応用生物科学専攻), 博士(農学)

現在, 東京大学特任准教授

祐川 侑司 (すけかわ ゆうじ)

2019年 東京工業大学工学院博士後期課程修了(情報通信系), 博士(工学)

現在, 東京大学特任助教

## 昆虫工学

— 新しい価値を創造する「昆虫の知能」の解明と応用 —

Insect Engineering — Elucidating and Applying “Insect Intelligence” to Create New Value —

© Ryouhei Kanzaki, et al. 2026

2026年7月17日 初版第1刷発行

★

検印省略

監著者 神崎 亮平

編著者 櫻井 健志

並木 重宏

光野 秀文

祐川 侑司

発行者 株式会社 コロナ社

代表者 牛来真也

印刷所 壮光舎印刷株式会社

製本所 株式会社 グリーン

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-06766-8 C3045 Printed in Japan

(西村)



＜出版者著作権管理機構 委託出版物＞

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。