

フジシール財団 研究助成事業
成果報告書

公益財団法人フジシール財団
理事長 岡 崎 裕 夫 殿

報告日 2026 年 5 月 1 日

研究課題	節足動物のパッケージングメカニズムの解明	助成金額
		100 万円
助成名	若手研究助成	
ふりがな	あだち はるひこ	研究助成申請年度
研究者氏名	足立 晴彦	2024 年度（追加）
所属機関	慶應義塾大学・先端生命科学研究所	研究期間
		1 年
役 職	特任助教	

下記の通り、研究成果を報告いたします。

記

1. 研究成果の概要

本研究は、節足動物の外骨格（クチクラ）を「生体が自己組織化によって構築し、脱皮によって更新される動的パッケージング構造」と捉え、その形成機構および機能原理の解明を目的として実施した。特に、外的環境からの保護というパッケージング機能を担うクチクラが、成長に伴ってどのように再構築され、形態形成と機能維持を両立しているのかに着目した。

まず、カワリヌマエビの一種（以下、カワリヌマエビ）を用いた研究（[Adachi et al., iScience, 2025](#)）では、後胚発生における尾部形態の形成過程を、脱皮ステージごとに比較解析した。尾部は、4 つの尾肢と 1 つの尾節からなる分岐構造を持つが、孵化直後の個体ではこの分岐構造が不明瞭である。孵化後の個体を脱皮までの間、ライブ観察をすると、数分間の脱皮過程で分岐構造が出現することがわかった。発生時系列で固定した尾の形態を計測したところ、尾節の長さは最初の脱皮で伸び、幅は逆に短くなることが明らかとなった。ここまでの結果から、カワリヌマエビの尾は最初の脱皮によって、(1) 分岐構造の出現 (2) 長さの増加と幅の減少という、2 つの大きな形態変化を示すことがわかった。この 2 つの変化はどのような仕組みで起こるのか。

蛍光染色像の観察により、孵化直後の段階で尾肢の原基と思われる構造が確認された。そこで、この部位の断面構造を切り出し、その詳細を観察した。透過型電子顕微鏡による高解像度観察の結果、孵化直後の尾肢原基および尾節原基の部分では、すでにクチクラの分岐によって尾肢と尾節が隔てられていることが明らかになった。このクチクラの分岐構造は、蛍光染色像においても確認された。このクチクラの分岐構造がどのようなプロセスで形成されるのかについては、興味深い点であり、今後の重要な研究課題となる。

次に、尾の原基の表面構造を走査型電子顕微鏡で観察した。その結果、脱皮までにまだ時間がある「脱皮中期」の個体では、表面が比較的滑らかであることがわかった。一方、脱皮直前になると、尾の伸長方向に対して垂直に多数の折り畳み構造が形成されていることが確認された。この折り畳み構造は、蛍光染色によっても観察されており、カブトムシの角などで確認されている ([Matsuda et al., Sci Rep, 2017; PMID 29066748](#)) ように、

この折り畳み構造が展開することで組織が伸長すると考えられる。ここまでの結果から、(1) 分岐構造の出現と(2) 長さの増加について、一定の理解が得られた。では、(2) 幅の減少はどのように生じるのか？

次に、脱皮過程の組織・細胞動態を観察するための *in vivo* 蛍光ライブイメージング系の確立に取り組んだ。UV-LED レジンを用いて生体をガラスボトムディッシュに固定した。また、カワリヌマエビはアセンブリされたゲノム情報がなく、遺伝学的な蛍光標識が難しかったため、蛍光標識レクチン(小麦胚芽レクチン)を用いて細胞・組織を染色した。その結果、孵化直後から1回目の脱皮までの60時間を超える長時間の *in vivo* ライブイメージングに成功した。タイムラプス画像による組織変形の解析の結果、尾肢の幅の減少は、孵化直後から脱皮までの間に徐々に進行することが明らかとなった。さらに、ライブイメージング解析から、血球系細胞が脱皮過程全体を通じて循環していることが確認された。節足動物は開放血管系であるため、この血球系細胞の循環は組織に圧力を与えると考えられる。一般に、この圧力は組織を拡張させる方向に作用するが、今回観察された幅の減少はこれと逆方向の変形である。このような圧力下で組織の収縮がどのように達成されるのかは、興味深い点であり、今後の重要な課題となる。以上の細胞・組織学的な解析により、カワリヌマエビの尾における最初の脱皮で生じる二つの主要な変形、(1) 分岐構造の出現と(2) 長さの増加および幅の減少について、少し理解が進んだ。

また、ライブイメージング解析によって、分解が進んだと考えられる脱皮直前の古いクチクラが、水の侵入を防ぐバリア機能を保持しているという興味深い可能性が考えられる現象を見出した。透過型電子顕微鏡による詳細な構造解析を行った結果、新旧クチクラの微細構造に明確な違いが存在することが明らかとなった。特に、脱皮直前の古いクチクラにおいて、カルシウム沈着を示唆する電子密度の高い構造が観察された。この構造は新しいクチクラでは顕著ではなく、成熟したクチクラに特徴的なものである可能性がある。これらの結果は、分解過程にあると考えられていた古いクチクラが、単なる残存構造ではなく特異的な物理化学的性質を保持していることを示唆するものである。さらに、このような高密度構造が撥水性や水の侵入防止といったバリア機能に関与している可能性が考えられるが、その因果関係については今後の検証が必要である。サンプルサイズの制約などにより、バリア機能の直接的な定量評価手法の確立には至らなかったが、その一方で、カワリヌマエビにおけるドラフトゲノムを獲得し、その情報を元に、RNAiを基盤とした分子生物学的解析手法の確立を進めることができた。これにより、今後はクチクラ関連遺伝子を対象としたRNAiスクリーニングを通じて、バリア機能を担う分子基盤の同定へと展開することが可能となった。

また、日本産イセエビ *Panulirus japonicus* のフィロソーマ幼生からプエルルス幼生への変態過程を対象とした研究 ([Adachi et al., Zoological Letters, 2026](#)) では、扁平な浮遊型形態から立体的な底生型形態への劇的な三次元転換機構を解析した。その結果、この形態転換は単なる変形ではなく、組織の再配置と再編成を伴う段階的プロセスであり、内部組織の再構築が先行し、その後に外骨格が形成されるという時間的秩序を持つことが明らかとなった。また、外骨格の形成が力学的拘束として作用し、形態変化を制御していることが示された。

これらの成果を統合すると、節足動物の外骨格は、(1) 自己組織化による階層構造形成、(2) 微細構造の異方性に基づく形態制御、(3) 構造と力学の相互作用による三次元形状の実現、(4) 機能を維持したまま更新される動的システム、という特徴を有することが明らかとなった。すなわち、クチクラは単なる防御構造ではなく、形態形成と機能維持を同時に担う“動的パッケージ”として機能していると位置付けられる。

以上より、本研究は、節足動物外骨格の形成過程を動的パッケージングシステムとして再定義し、その構造・機能・形成の統一的理解を提示したものである。この枠組みは、生体構造の理解に新たな視点を与えるとともに、機能性材料設計へと展開可能な基盤原理を提供する。

2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性

本研究は、節足動物の外骨格（クチクラ）を「生体が自己組織化によって構築する天然のパッケージング構造」と捉え、その形態形成メカニズムを解明したものである。パッケージングの本質が外的環境からの保護、軽量性、機能性の両立にあるとすれば、外骨格はそれを高度に実現する生物学的モデルと位置付けられる。*iScience* 掲載論文では、淡水エビにおける脱皮過程を解析し、溝構造の異方的拡張を介して方向依存的に形状が制御される可能性を示した。

さらに、イセエビ（*Panulirus japonicus*）の幼生から変態期にかけての甲羅形成を解析した *Zoological Letters* 掲載論文では、大規模な三次元形状転換が段階的な組織再編と力学制御によって実現されることを明らかにした。

これらの成果から抽出される設計原理は、①自己組織化による階層構造形成、②異方性制御による機能付与、③構造-力学連関による可変形設計、の三点である。これらは、軽量かつ高強度な包装材、衝撃吸収と形状保持を両立する機能的勾配材料、さらには折りたたみ・展開可能な可変型パッケージの設計思想へと転換できる可能性がある。

加えて、外骨格の主成分であるキチン系複合体は生分解性を有しており、循環型社会に適合した高機能バイオマテリアル開発への理論基盤ともなり得る。

以上より、本研究は節足動物外骨格の形成原理を工学的設計原理として抽出することで、次世代パッケージング材料の高機能化および環境調和化に貢献する可能性を有する。

3. 学会発表、学会誌等への論文掲載、産業財産権出願などの実績（現時点で未発表・未掲載・未出願のため、上記「1. 研究成果の概要」、「2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性」の当財団ホームページ上の公開の延期を希望される場合、その旨 記載してください。）

***Adachi, Haruhiko, et al.** "Post-embryonic tail development through molting of the freshwater shrimp *Neocaridina denticulata*." *iScience* 28.2 (2025).

***Adachi, Haruhiko, et al.** "Morphogenesis of the carapace from phyllosoma to puerulus in the Japanese spiny lobster." *Zoological Letters* (2026). *in Press*