

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870125

研究課題名(和文) 昆虫の翅にみられる折りたたみ・展開機構を応用した革新的展開構造の創成

研究課題名(英文) Development of innovative deployable structures based on Beetle wing folding/unfolding mechanisms

研究代表者

斉藤 一哉 (Saito, Kazuya)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：40628723

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：甲虫目を初めとする折りたたみ型の後翅を有する昆虫の翅の展開・収納行動をハイスピードカメラ、3次元計測技術を用いて詳細に観察する手法を構築し、ハネカクシ、テントウムシの収納・展開メカニズムの解明に成功した。折紙の幾何学を用いて翅のデザインを弾性力学的観点から説明する新しい折りたたみモデルを提案すると共に、人工の展開翼に応用するための折線パターンの一般化を行った。昆虫の翅は、人工物とは比較にならないほどの高い収納率、展開再現性、信頼性、軽量を併せ持っている。本研究成果はこれらの優れた特性を工学応用する道を開くものである。

研究成果の概要(英文)：This study developed the new observing methods for wing folding/unfolding techniques in insects by using high-speed cameras and the 3D measuring systems. Based on these techniques, wing folding/unfolding mechanisms in a rove beetle and a ladybird beetle were clarified. This study also used the origami geometry and proposed the geometric model to explain the wing transformation mechanisms from the point of view of the elastic deformation. By applying these achievements, the generalized crease patterns that can be used in the design of the deployable structures were proposed. From an engineering standpoint, these wings have an interesting property: they can achieve compact storing without compromising the strength and stiffness of the wing structure. These finding constitutes an indispensable initial foothold to apply above excellent properties in artificial structures.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：生物模倣工学 昆虫 折紙 宇宙展開構造 スマート構造

1. 研究開始当初の背景

飛翔昆虫たちの持つ優れた飛行性能は古くから工学者たちの注目を集めてきた。極めて軽量ながら時に数百 Hz にも達する高周波の羽ばたきに耐えうる強度・剛性を発揮する彼らの翅は構造力学・材料力学の観点からも非常に興味深い研究対象であり、軽量化が求められる航空機・宇宙機の開発に非常に役に立つ知見を与えると期待される。一部の昆虫たちの翅は、これらの非常に高度な飛行性能に加え、収納・展開能力という高度な機能を備えている。これらの折り畳み型の翅の工学的な面白さは、飛行のために必要な強度・剛性(安定性)と、折り畳みに必要な可変性(不安定性)が見事に両立されている点に集約される。これらの昆虫の後翅の持つ収納・展開機能に学ぶことで、人工衛星用の太陽電池パネルや大型アンテナを初めとする宇宙展開構造物を革新的に進化させることができると期待される。

2. 研究の目的

本研究は、甲虫目や革翅目を初めとする折りたたみ型の後翅を有する昆虫の翅の展開・収納行動をハイスピードカメラ、3次元計測技術を用いて詳細に観察し、折紙の幾何学を用いて翅のデザインを弾性力学的観点から説明する新しい折りたたみモデルを提案することで、革新的な展開構造を創成することを目的とする。昆虫の翅は、人工物とは比較にならないほどの高い収納率、展開再現性、信頼性、軽量性を併せ持っている。従来研究で無視されてきた翅脈の3次元形状や、局所的な弾性変形まで含めてモデル化することで、上記の優れた特性を生み出す仕組みを解明する。

3. 研究の方法

本研究はカブトムシ、テントウムシ、ハネカクシを主なターゲットとして、それぞれの種において高速度カメラを使った生体観察による後翅の展開・収納プロセスの解明、マイクロCTスキャナによる立体構造の調査、折紙モデルによる展開・収納挙動の再現と検証を行った。さらに得られた立体データを用いて有限要素法による数値シミュレーションを行い、翅のフレームの機械的特性の解析を行った。

4. 研究成果

4-1 ハネカクシの後翅の収納プロセスの解明

ハネカクシは他の甲虫と異なり鞘翅が短く胴体がむき出しになった特徴的な身体をしているが、小さな鞘翅の下に飛翔のための後翅が非常にコンパクトに収納されている。本研究はハイスピードカメラによるハネカクシの離陸と翅の収納動作の解析を行い、具体的な折りたたみプロセスと左右の翅の展

開図を世界で初めて示した。図1は折り畳み動作の概略を示す。この折り畳みは、左右非対称であること(図2)、左と右でパターンを入れ替えることができるなど、工学的に興味深い特徴をいくつも有しており、革新的な可変構造やコンプライアント・メカニズムが設計できると期待される。本研究成果の詳細は論文1で詳しく解説されている。

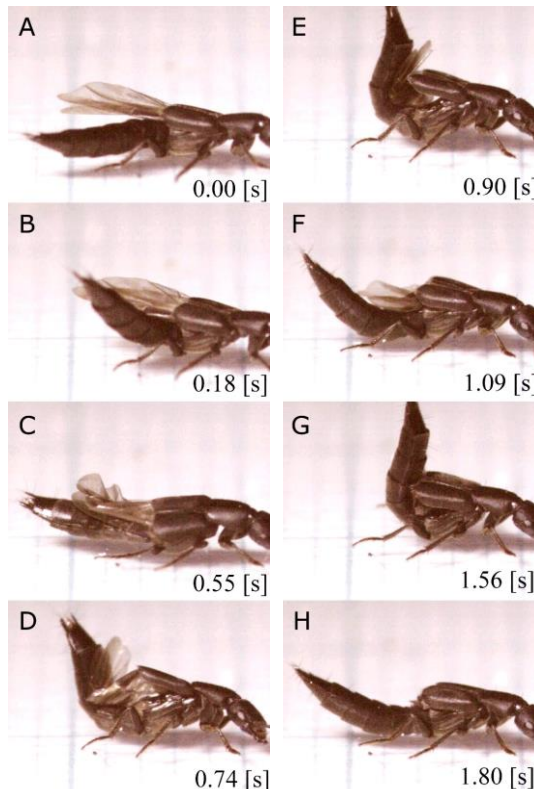


図1 ハネカクシの収納動作の高速度カメラによる解析。柔軟に動く胴体を使って左右非対称なパターンで翅を収納する。

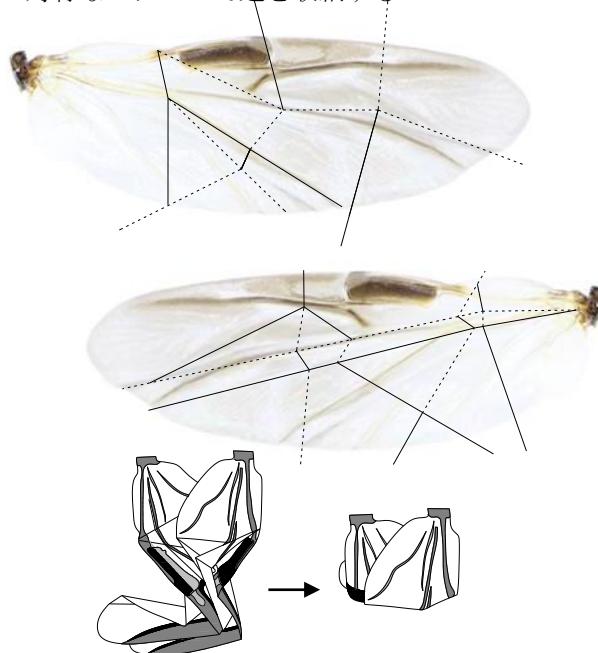


図2 ハネカクシ後翅の展開図。収納動作の方向を変えることで鏡像に折り畳むこともできる。

4-2 テントウムシの後翅の収納プロセスの解明

甲虫の中でも翅の強度・剛性と折り畳みのコンパクトさをバランスよく兼ね備えているテントウムシに着目し、後翅を折り畳む具体的なプロセスと翅の3次元構造を明らかにした。本研究ではUV硬化樹脂とシリコン印象材で透明な人工鞘翅を作って移植する独創的な手法に加え、マイクロCTスキャナによる立体構造の解析や、得られた3次元形状データを利用した有限要素解析による機械的特性の解析など新しい研究手法が多数提案された。図3に折り畳みプロセスの概略を、図4に後翅の展開図を示す。本研究結果は論文2に詳しく記載されている。

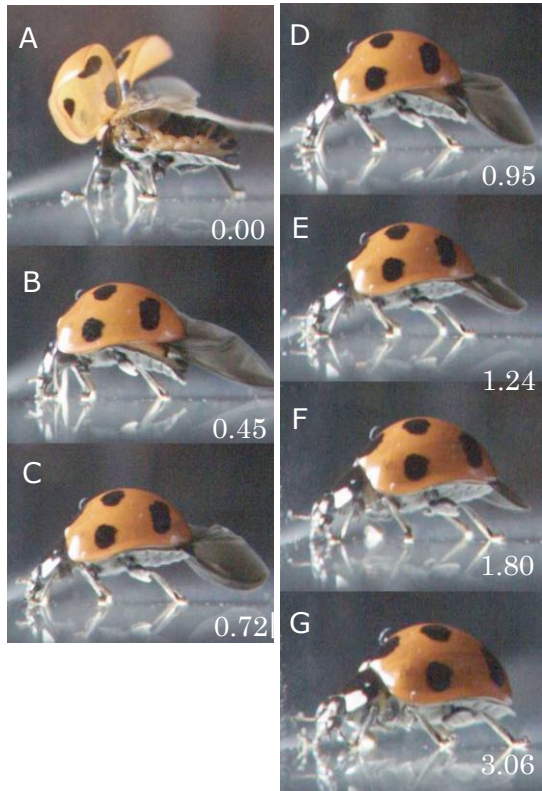


図3 ナナホシテントウの後翅の収納動作。後方に揃えて伸ばした後翅を閉じた鞘翅で抑え、背中を使って押し込むように収納スペースに引き込む。



図4 ナナホシテントウの後翅の展開図

4-3 マイクロCTによる後翅の立体構造の解明

甲虫の後翅の展開・収納機構は、複数の剛体パーツをジョイントで繋いで構成される人工の機械の可動部と異なり、一体型のフレームがフレキシブルに変形することで複雑な動きを実現している。ここでは材料(クチクラ)そのものの柔軟性だけでなく構造の弾性座屈が巧みに利用されている。この仕組みを解明するため、マイクロCTスキャンによって翅の立体構造の解明を行った。図5、図6にハネカクシとテントウムシの後翅のCT結果から再構成した立体モデルを示す。テントウムシ後翅の先端部分のフレームは、巻尺のようにカーブした断面をもっており、これは宇宙展開構造に多用されているテープ・スプリングと同じ働きを持つものと考えられる(論文2)。

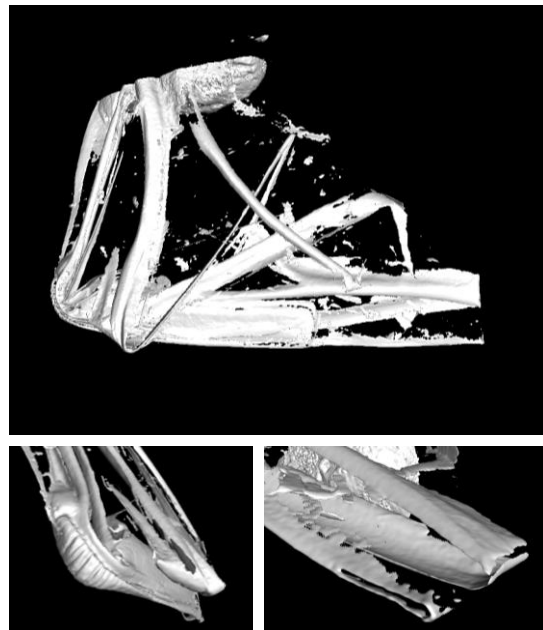


図5 ハネカクシ後翅の収納形状のCTスキャナによる解析。屈曲部に蛇腹状の特徴的な構造が見られる。

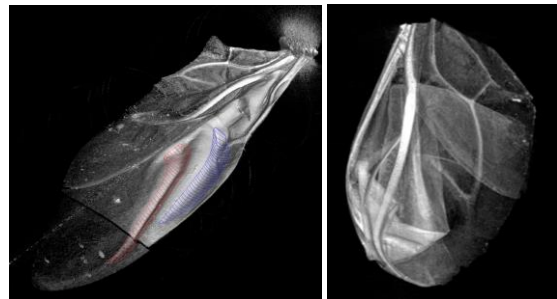


図6 マイクロCTスキャンによる3次元形状解析。斜線で示しているのがテープスプリング型のフレーム。

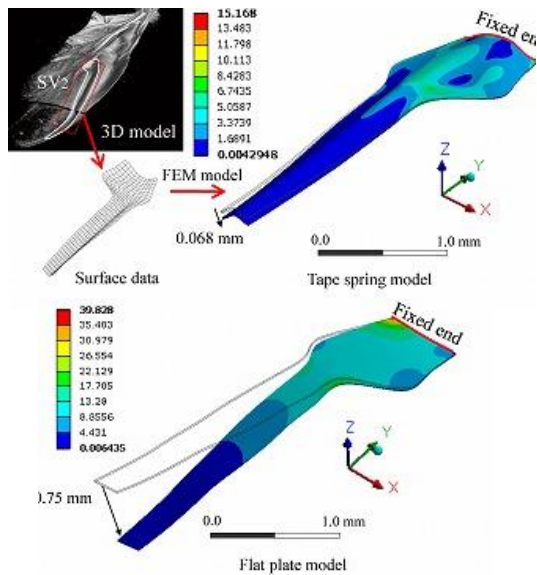


図7 CT 結果を応用した数値シミュレーションによる解析. テープスプリング型の断面を持つフレームは, 同じ重量のフラットなフレームと比べて 11 倍の曲げ剛性を持つことが示された.

本研究ではさらに, これらの立体データを用いて有限要素法による数値シミュレーションを行い, 翅脈の機械的特性の解析を行った. 図7に一部の結果を示す.

4-4 折紙モデルの創成

甲虫の複雑な折り畳みを理解する上で, 折り畳みのパターンを展開図として示すことは非常に有効である. Forbes⁽¹⁾や Fedorenko⁽²⁾の著作には様々な甲虫の後翅の展開図が記載されているが, これらの展開図は折線の大まかな位置を表すために描かれており, そのまま印刷しても折り畳むことは不可能である. 各頂点で折り畳み条件が満たされるように折線の角度を修正することで実際に折り畳むことができる図2, 4のような模型(折紙モデル)を作成することが可能である. さらに本研究でカブトムシなどの大型甲虫に見られる代表的な折線パターン(図8)に着目し, この折り畳みを模した人工翼を開発するために必要な折線パターンの設計法を提案した. 図9にこの手法によって設計された折り畳み可能な展開図の例を示す. 本手法によって, 甲虫の後翅と同じ構造と機構もつ展開翼の折線パターンを自由に設計することができる. これによって高度な収納・展開機構と高い機械的特性を両立させている甲虫の後翅の優れた特性を工学に応用できると期待される.

文献

- (1) Forbes WTM (1926) The wing folding pattern of the Coleoptera. J. N. Y. Entomol. Soc. 24, 91-139.
- (2) Fedorenko DN (2009) Evolution of the Beetle Hind Wing, With Special Reference to Folding (Insects, Coleoptera) (Pensoft Publishers, Sofia).

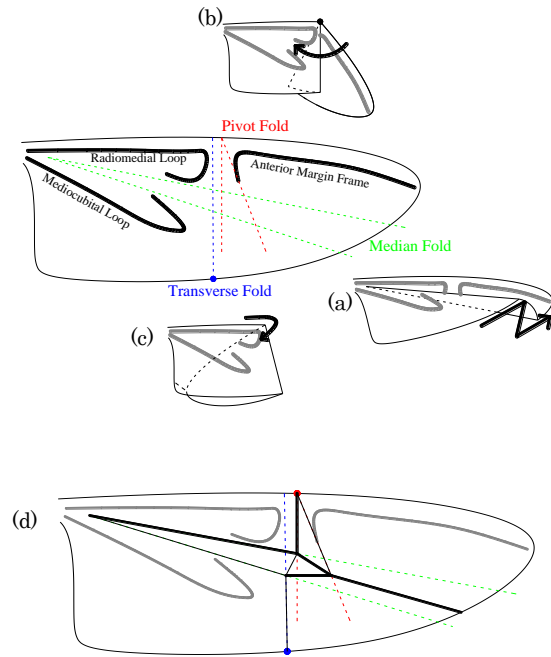


図8 大型甲虫に見られる代表的な折線パターン. 翅を幅方向に折り畳む(a)の Median Fold, 長さ方向に折り畳む(b)の Transverse Fold, 前縁部のフレームを旋回させる(c)の Pivot Fold が中心部で交わり, 三角形が生じる.

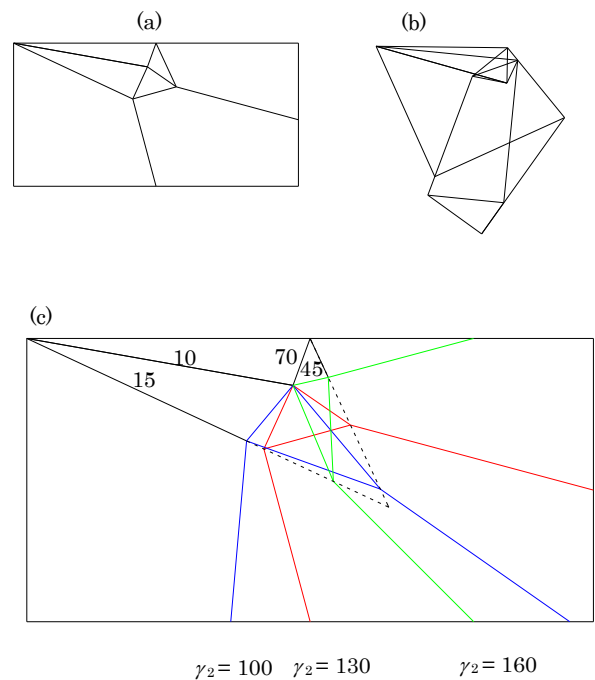


図9 図8の折線パターンの設計法を一般化することで得られた展開翼用の折線.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

1. Saito, K., Nomura, S., Yamamoto, S., Niiyama, R., Okabe, Y., 2017, Investigation of hindwing folding in ladybird beetles by artificial elytron transplantation and micro computed tomography, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114-22.
<http://www.pnas.org/content/114/22/5624.full>
2. Saito, K., Yamamoto, S., Maruyama, M., Okabe, Y., 2014, Asymmetric hindwing folding in rove beetles, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 111(46), pp.16349-16352.
<http://www.pnas.org/content/111/46/16349.abstract>

[学会発表] (計20件)

1. Kazuya Saito, Yoji Okabe. Elastic Wing Deployments in Beetles and Their Folding Mechanisms, *ASME IDETC/CIE2015, 39th Mechanisms and Robotics Conference*, Boston, USA, 2015.8.4, DETC2015-46559
2. Kazuya Saito, Yoji Okabe. Beetle Inspired Deployable Structures, *The 26th International Conference on Adaptive Structures and Technologies*, Kobe, Japan, 2015.10.15, No. 078

[図書] (計1件)

1. ハイスピードカメラによる昆虫の翅の展開・収納動作の解析 in *インスツルメンテーションの視点からみたバイオミメティクス*, 第2章, CMC リサーチ, pp. 11-19, 2016年7月

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：

取得年月日：

国内外の別：

[その他]

アウトリーチ活動

1. 2017年1月15日, 日本科学未来館, サイエニストクエスト講師「技あり! 昆虫たちに学ぶ 折りたたまのテクニク」

プレスリリース

1. 2014年11月4日, 東京大学, 昆虫界の“最難”折りたたま: ハネカクシの翅の隠し方の謎を解明
2. 2017年5月17日, 東京大学, 水玉模様の下に隠されたテントウムシの驚きの収納術

メディア出演

1. 2016年10月2日, NHK(Eテレ)サイエンスZERO, 「折り紙」大進化! 宇宙から医療まで」
2. 2015年7月26日, BSフジ「ガリレオX」, オリガミと科学との出会い
3. 2014年11月23日, TBS「未来の起源」

6. 研究組織

(1)研究代表者

斉藤 一哉 (Kazuya Saito)
東京大学 生産技術研究所
・機械生体系部門・助教

研究者番号: 40628723

(4)研究協力者

野村周平 (Shuhei Nomura)
国立科学博物館・研究主幹
丸山宗利 (Munetoshi Maruyama)
九州大学総合研究博物館・助教
山本周平 (Shuhei Yamamoto)
九州大学総合研究博物館・協力研究員
館知宏 (Tomohiro Tachi)
東京大学大学院総合文化研究科