

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04911

研究課題名(和文) 昆虫に見られる外骨格の弾性を利用した高速変形メカニズムの解明とその工学応用

研究課題名(英文) Clarification of high-speed transformation mechanisms using exoskeletal elasticity in insects and its engineering applications.

研究代表者

斉藤 一哉 (Saito, Kazuya)

九州大学・芸術工学研究院・講師

研究者番号：40628723

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,400,000円

研究成果の概要(和文)：昆虫後翅の収納・展開機構を中心に、外骨格生物特有の骨格の弾性を利用した高速変形メカニズムを解明し、工学に応用するため、ハイスピードカメラやマイクロCT装置を使った独自の手法を開発し、巨大な宇宙構造から微小な医療デバイスまで様々な用途・スケールで応用可能な新しい形状可変機構の設計手法を構築した。テントウムシ、カブトムシなどの甲虫やハサミムシの翅の折り畳みメカニズムを折紙の幾何学によってモデル化することによって、人工の可変構造物に応用するための設計原理を明らかにするとともに、3Dプリンタを初めとするデジタルファブリケーション技術によって実装を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大きな構造を小さく折り畳む技術は巨大な宇宙展開構造から傘や扇子などの日用品まで様々な目的やスケールで用いられている。昆虫の翅は高速の羽ばたきに耐えられる強度・剛性と高速かつコンパクトな折り畳みの両方を実現している究極の展開構造である。本研究は、この優れた特性を直接工学に応用し、人間が使うことを可能にするものであり、展開構造だけでなく変形機能を持つ製品や機械のデザインを大きく変えるポテンシャルを持っている。宇宙構造が大型化する中で折り畳みの技術の重要性は増しており、人工衛星用の太陽電池パネルやアンテナ鏡面の折り畳みへの応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：This study aims to clarify the high-speed morphing mechanisms found in the exoskeleton organisms represented by the foldable wings in insects and to apply them in engineering. We proposed new observing techniques using the high-speed camera and the micro-CT and constructed new design method that can be applied to various applications and scales from huge space structures to minute medical devices. Origami geometry was used to clarify the design principle for wing folding in beetles and earwigs, and various prototypes of the deployable structures were implemented by using the digital fabrication techniques.

研究分野：生物模倣工学

キーワード：生物模倣工学 展開構造 可変構造 航空宇宙工学 折紙工学

### 1. 研究開始当初の背景

ドイツのインダストリ 4.0 を初めとする第 4 次産業革命構想では、顧客から工場までをシステムで統合したマスカスタマイゼーションによる多品種少量生産のものづくりが構想されている。これは大量生産大量消費から脱却し持続可能な社会を構築するため工学全体で達成しなければならない課題である。昆虫を初めとする外骨格生物の可変メカニズムは、人工の機械と異なり、材料の柔らかさや弾性変形を巧みに利用して高速かつ複雑な動きを実現している。ここから学ぶことで、剛体パーツをジョイントで接合する機械的メカニズムに頼らずに可変機構を設計・製造できると期待される。可動パーツの一体成型によるこれまでにない大幅な部品点数削減(リサイクルも容易)が可能となるだけでなく、3Dプリンタによって「形」だけでなく「動き(機能)」を含めて出力することが可能となる。これはアメリカで進められてる3Dプリンタ革命の一步先を行く技術であり、今後立体造形がものづくりの主役となるうえで必須の技術である。

### 2. 研究の目的

本研究は昆虫後翅の収納・展開機構の研究を軸に、外骨格生物特有の骨格の弾性を利用した高速変形メカニズムを解明することで、巨大な宇宙構造から微小な医療デバイスまで様々な用途・スケールで応用可能な新しい形状可変機構の設計手法を構築することを目的とする。これは【三次元計測・運動解析技術による形と動きのデータ化】、【モデル化とシミュレーション・実験による検証】、【人工物による動きと機能の模倣】の3つの要素技術の開発で実現される。これらの実現によって様々な生物の「形」と「動き」の工学原理を解明し、機械システムに応用する応用する構造系バイオミメティクスの統一的なアプローチを確立すると共に、次世代の多品種少量生産・高付加価値のものづくりを加速する“組み立て不要の機械”の核心技術を構築する。

### 3. 研究の方法

昆虫の後翅の形状可変機構を中心に研究を行い、構造系バイオミメティクスを確立するための観察、モデル化、模倣という3つの重要なプロセスについて研究手法を確立した。

<観察フェーズ> X線マイクロCTによる昆虫身体の立体データ取得手法を確立した。外骨格以外の柔らかい部分(翅の膜や筋肉)を撮像するため、機種を選定や撮影パラメータの調整、造影剤の利用などのノウハウを構築した。また、小型昆虫の高速撮影技術を発展させ、透明人工鞘翅の移植など独自技術を開発した。

<モデル化フェーズ> 観察フェーズで得られた形状データを基に、有限要素解析による数値シミュレーションや3Dプリンタで出力したスケールアップモデルを使った実験によってその動作原理の解明に取り組んだ。実際の形状をできるだけ忠実に再現するだけでなく、特著的なパターンを抽出して幾何学モデルを作成し、パターンと形状可変機構の体系化を行った。

<模倣フェーズ> 3Dプリンタでの一体成型を中心に宇宙展開構造や小型飛行機用の可変翼など試作を行った。さらに、外骨格の可動部に使われている弾性ヒンジ構造や、ロック・リリース機構について研究し、3Dプリンタでの人工的に再現に取り組んだ。

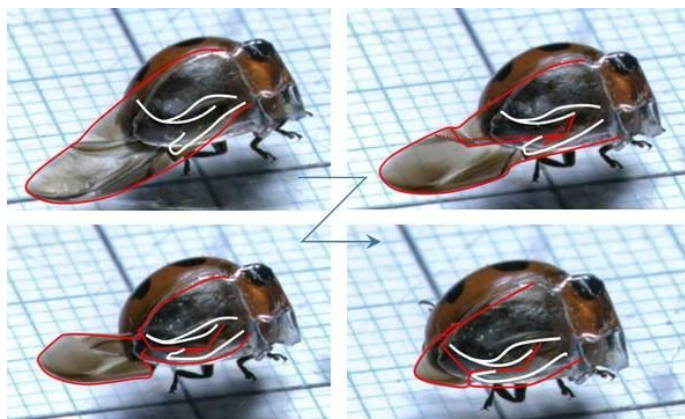


図1 透明鞘翅の移植による折り畳みプロセスの観察

### 4. 研究成果

(1) テントウムシの翅の折り畳みメカニズムの解明(文献)

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テープ・スプリング構造の存在と機能を明らかにした。本研究で困難だった点は、ハイスピードカメラを用いて折り畳み方法を観察しようとしても、鞘翅が邪魔になって詳細なプロセスがわからない点にあった。この研究で応募者は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という独創的な手法によって問

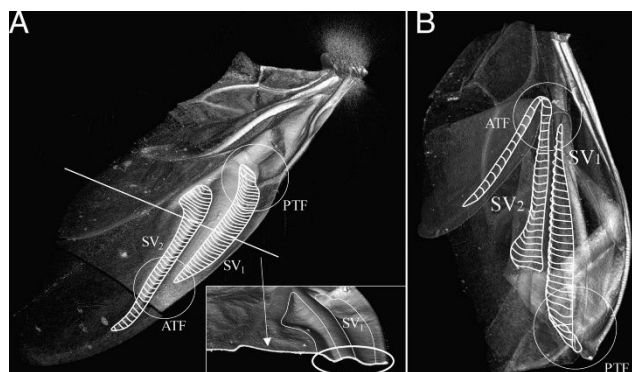


図2 マイクロCT装置による翅脈の解析

題を解決し(図 1)、マイクロ CT スキャナによる立体構造の解析(図 2)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を多数提案し、宇宙展開構造に使われているテープ・スプリング型のフレームが高い翅の剛性・強度とコンパクトな折り畳み、迅速な展開を可能にしていることを示した(図 3)。本成果は米国科学アカデミー紀要(PNAS)の表紙を飾り、The New York Times やル・モンドを初め海外の主要メディアでも取り上げられるなど大きなインパクトがあった。

### (2)カブトムシの後翅の折り畳みを応用した展開構造の開発(文献 )

カブトムシ、テントウムシなどの甲虫目は、固い前翅(鞘翅)の下に後翅を折り畳み収納することで、傷付きやすい後翅を防御しながら地上や樹上、狭い場所での機動力を確保している。折り畳みパターンは非常に多様性に富んでいるが、カブトムシやクワガタムシなどの大型の甲虫の折り畳みには、共通してみられる三角形上の折り畳みパターンが存在する(図 3)。本研究はこのパターンを折紙の幾何学によって解析することで、折り畳み条件や剛体折り条件を明らかにするとともに、人工の展開構造物に応用するための設計原理を明らかにした。これによって、コンパクトかつ迅速な展開・収納と広げた際の高い強度・剛性などの優れた特性を展開構造の設計に利用することが可能になった。さらに、得られた展開図設計法を用いて小型の羽ばたきドローンの展開翼を開発し、市販の羽ばたきドローンへの実装を行った(図 4)。

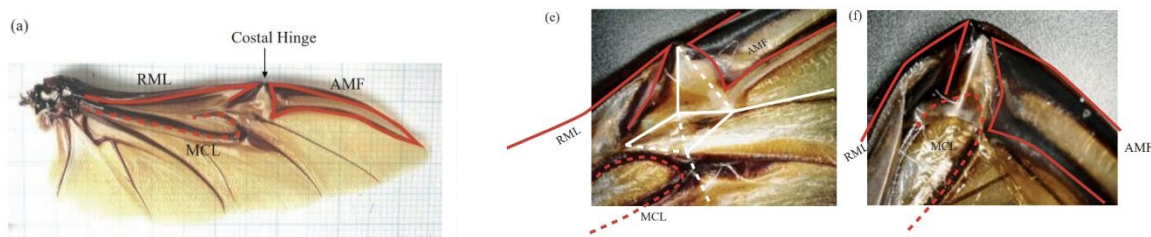


図 3 カブトムシの後翅に見られる 3 角形パターン

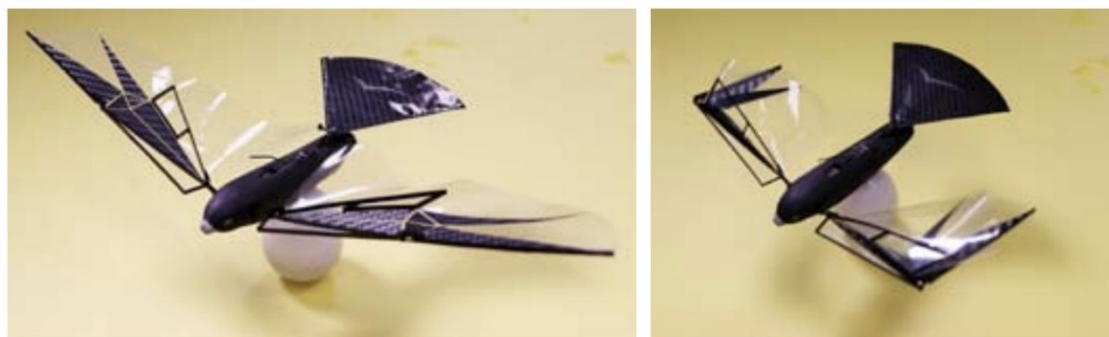


図 4 折り畳み翼の羽ばたきドローンへの実装

### (3)ハサミムシの扇子の折り畳みの解明(文献 )

ハサミムシの後翅は広げた状態から 1/15 以下と昆虫の中で最もコンパクトに折り畳むことができるうえ、翅脈ヒンジ部の弾性を利用した高速収納や展開後の形状維持のためのスナップスルー機構など工学的に興味深い特性を多く備えているが、折り畳みパターンが複雑すぎて人工の展開構造への応用が難しかった。申請者は昆虫学者や古生物学者らと共同で、この複雑な折り畳みパターンが極めてシンプルな幾何学的ルールで設計できることを明らかにし、展開図の作図法と設計ソフトウェアを提案した(図 5)。

これによって上記のハサミムシの折り畳みの優れた特性を、人工衛星用太陽電池パネルなどの宇宙展開構造や建築物から傘や扇子などの日用品まで、サイズや形状の異なる様々な製品に応用することが可能となった(図 6)。さらに古生物学者と共同で、この幾何学的ルールがペルム紀のハサミムシの近縁種と考えられる昆虫の翅の折り畳みにも適用可能であることを明らかにし、この折り畳みの原理が 2.8 億年前から変わらずに採用されている優れた展開構造であること示した。

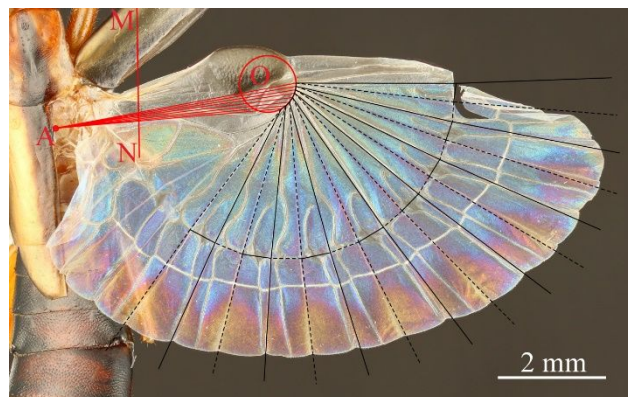


図 5 ハサミムシの翅の展開図設計法の概略装

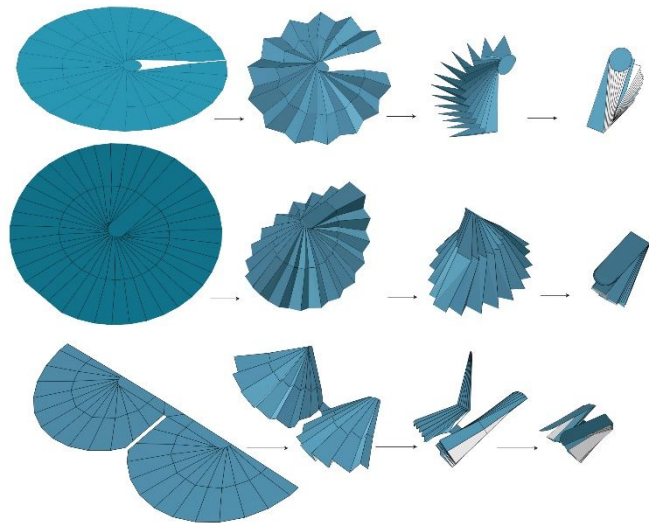


図 6 ハサミムシの翅の折り畳みを応用した様々な展開構造

< 引用文献 >

Kazuya Saito, Shuhei Nomura, Shuhei Yamamoto, Ryuma Niiyama, Yoji Okabe, Investigation of hindwing folding in ladybird beetles by artificial elytron transplantation and micro computed tomography, Proc. Natl. Acad. Sci., vol. 114, pp. 5624–5628(2017).

Kazuya Saito, Tachi Tomohiro, Fujikawa Taro, Niiyama Ryuma, Yoshihiro Kawahara, Deployable Structures Inspired by Insect Wing Folding, in Origami 7: Proceedings from the seventh meeting of Origami, Science, Mathematics and Education, Vol.3, 747 - 762 (2018).

Kazuya Saito, Ricardo Pérez-de la Fuente, Kôichi Arimoto, Young ah Seong, Hitoshi Aonuma, Ryuma Niiyama, Zhong You, Earwig fan designing: biomimetic and evolutionary biology applications, Proc. Natl. Acad. Sci. vol. 117, 17622-17626 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kazuya Saito, Tomohiro Tachi, Taro Fujikawa, Niiyama Ryuma, Yoshihiro Kawahara	4. 巻 3
2. 論文標題 Deployable Structures Inspired by Insect Wing Folding	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Origami 7: Proceedings from the seventh meeting of Origami, Science, Mathematics and Education	6. 最初と最後の頁 747-762
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jinxiang Chen, Xiaoming Zhanga, Yoji Okabe, Kazuya Saito, Zhensheng Guoa, Longcheng Pana	4. 巻 131
2. 論文標題 The deformation mode and strengthening mechanism of compression in the beetle elytron plate	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Materials & Design	6. 最初と最後の頁 481-486
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.matdes.2017.06.014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kazuya Saito, Shuhei Nomura, Shuhei Yamamoto, Ryuma Niyama, Yoji Okabe	4. 巻 114
2. 論文標題 Investigation of hindwing folding in ladybird beetles by artificial elytron transplantation and micro computed tomography	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. Natl. Acad. Sci.	6. 最初と最後の頁 5624-5628
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1073/pnas.1620612114	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 斉藤一哉	4. 巻 6
2. 論文標題 折紙の数理と生物模倣に基づく先進構造材料の開発に関する研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 折り紙の科学	6. 最初と最後の頁 32-35
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kazuya Saito, Ricardo Prez-de la Fuente, Koichi Arimoto, Young ah Seong, Hitoshi Aonuma, Ryuma Niiyama	4. 巻 117
2. 論文標題 Earwig fan designing: Biomimetic and evolutionary biology applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. Natl. Acad. Sci.	6. 最初と最後の頁 17622-17626
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2005769117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 斉藤一哉	4. 巻 55
2. 論文標題 テントウムシ後翅の収納・展開メカニズム	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 昆虫と自然	6. 最初と最後の頁 20-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 斉藤一哉
2. 発表標題 ハサミムシの扇子の数理
3. 学会等名 明治大学研究ブランディング事業, 第5回公開シンポジウム「数理学する明治大学」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 斉藤一哉
2. 発表標題 ハサミムシの扇子の設計法
3. 学会等名 明治大MIMS同研究会「折り紙の科学を基盤とするアート・数理および折紙工学への応用研究」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuya Saito
2. 発表標題 Folding Patterns in Insect wings
3. 学会等名 ART+NATURE SYMPOSIUM, UC Berkeley, 2019.11.10 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuya Saito, Tomohiro Tachi, Taro Fujikawa, Niiyama Ryuma, Yoshihiro Kawahara
2. 発表標題 Deployable Structures Inspired by Insect Wing Folding
3. 学会等名 7th meeting of Origami, Science, Mathematics and Education (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuya Saito
2. 発表標題 Origami- and Bio-inspired Deployable Structures
3. 学会等名 Beyond Industry 4.0: Digital Fabrication and Local Craft (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 斉藤一哉
2. 発表標題 折紙の幾何学と自然の中の折りたたみ構造
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会 (2019年) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuya Saito
2. 発表標題 Patterns in Insect Wings
3. 学会等名 Tokyo-Berkeley Symposium: Forms in Nature and Art (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Lee D., Saito K., Umedachi T., Ta T.D., Kawahara Y.
2. 発表標題 Origami robots with flexible printed circuit sheets
3. 学会等名 UbiComp/ISWC 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuya Saito, Tomohiro Tachi, Ryuma Niiyama, Yoshihiro Kawahara
2. 発表標題 Design of a Beetle Inspired Deployable Wing,
3. 学会等名 ASME IDETC/CIE2017, 41th Mechanisms and Robotics Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 斉藤一哉, 館知宏, 新山龍馬, 川原圭博, 岡部洋二
2. 発表標題 カブトムシ型展開翼の折線設計法
3. 学会等名 第59回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 斉藤一哉
2. 発表標題 昆虫後翅の折り畳みに基づく可変構造の開発
3. 学会等名 第2回アクティブ・ソフトマター研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Kazuya Saito	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Jenny Stanford Publishing	5. 総ページ数 16
3. 書名 Strange wing folding in a rove beetle, Industrial Biomimetics (eds. A Miyauchi, M Shimomura)	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 折り曲げ線の設計方法、設計装置、及びプログラム	発明者 斉藤一哉	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-090374	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

個人ホームページ <a href="https://ksaito-tech.wixsite.com/ksaito">https://ksaito-tech.wixsite.com/ksaito</a> <a href="https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/utokyo-research/research-news/unfolding-the-folding-mechanism-of-ladybug-wings.html">https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/utokyo-research/research-news/unfolding-the-folding-mechanism-of-ladybug-wings.html</a> <a href="https://ksaito-tech.wixsite.com/ksaito">https://ksaito-tech.wixsite.com/ksaito</a>
---

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 Structural Origami Gathering 2018	開催年 2018年～2018年
---	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------