

## 自己評価報告書

平成 23 年 4 月 11 日現在

機関番号：12608  
 研究種目：基盤研究(S)  
 研究期間：2008～2012  
 課題番号：20226006  
 研究課題名(和文) 計算力学と折紙工学融合による新しい軽量コア構造の機能創出と製造法に関する研究  
 研究課題名(英文) Research on the Manufacturing Method and Creating the Function of New Lightweight Core Structure by Fusion of the Origami Engineering and the Computational Mechanics  
 研究代表者 萩原 一郎 (HAGIWARA ICHIRO)  
 東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
 研究者番号：50282843

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：折紙工学、空間充填幾何学、ダイアコア、軽量コア、立体折り紙

## 1. 研究計画の概要

軽量で高剛性、高強度のコア構造は省資源に役立つ事からますます重要となる。コアの代名詞であるハニカムコアは熱に弱く、高価であるがハニカムコアに代わるものは得られていない。折紙工学と空間充填理論によって得られたダイアコアは「日本の折紙の産業応用への大いなる可能性」として Nature に取り上げられた。この可能性ある折紙工学が確かに産業応用されるためには計算力学援用による安価な成形法の確立、機能の最適化が必要である。更に、野島は既存の角柱型のコアモデルとは全く異なる、展開収縮可能な円筒折り、円形膜折り、円錐形状膜折りなど数々の独創的なコア構造を創案している。本研究では、ダイアコアの安価な製造法の確立、遮熱、吸音・遮音などの機能創出等を行うとともに、展開収縮可能な新しい概念に基づくコア構造についても同様に、計算力学を援用し新しい意匠デザイン、機能創出と安価な成形法の開発を目指す

## 2. 研究の進捗状況

(1) 四面体と八面体の空間充填幾何学から得られるダイアモンドコアを特にオクテッドトラスと称し、この様にコアが設けられる構造では、中央部は張出成形、最外列では端末部から板が流入することになり、場所によって成形条件が異なることが、深い形状を単純プレス成形した時の反りの原因となる。そこで計算力学の援用により最適な多工程成形法を世界に先駆け構築し太陽電池パネルに採用され新聞に掲載された。続いて、OAフロア、新幹線床構造への利用検討も始まった。以上、ハニカムコアに総合的に勝るコアの開発を得た。

(2) ①植物は螺旋形により展開収縮していることに倣って開発した反転螺旋型円筒折り紙コア構造を対象に段数、辺数、反転角を設計パラメータとする最適化解析を行い現行自動車車両の矩形断面強度部材の1.8倍ものエネルギー吸収特性を得た。また、ハイドロフォーミングによって比較的安価に試作できることを示し雑誌に紹介された。②折り紙の展開面と非線形有限要素法を組

み合わせ剛体折りに塑性変形まで考慮する構造を新たに開発し画期的な包装機の開発につなげた。③立体折りでは従来の直線折りを拡張した曲線折りにより様々な立体折り紙が得られることを見出した。これにより新しいファッションやデザインに結びつける礎を得た。以上、展開収縮可能という折り紙の特色を利用した構造体の開発を初め、剛体折り、立体折り、などに関しても世界最新の研究成果を上げ、更に飛躍できる可能性を示した。

(3) 中学生やその父兄を対象に「ひらめき☆ときめきサイエンス」プログラムで「君も偉大な発明家～日本伝統の折り紙で“あつと驚く”新製品を～」と題し一般公開した。シミュレーション学会誌では「折紙工学の現状と課題」の特集号を企画した。また応用数理学会、機械学会では昨年(2021)に「折紙工学」関係の発表会を主宰し、折紙工学の啓蒙と推進を行った。

## 3. 現在までの達成度

①当初の計画以上に進展している。

(理由)

(1) トラスコアは、樹脂製の場合、真空成形によって比較的容易にその形状を成形できるが、金属製の場合、四面体形状の凹部が多数整列しているため、従来技術では超塑性成形、対向液圧成形など特殊で高価な成形法を用いる必要があった。そこで計算力学の援用により最適な多工程プレス成形法を世界に先駆け構築し太陽電池パネルに採用された。続いて、OAフロア、新幹線床構造への利用検討も始まった。ダイアコアが総合的にハニカムコアに優るという新聞などマスコミからの評価は一連の我々のペーパーや代表者主宰の講演会や発表会などによってであり、成果の発信も適宜行っている。

(2) 「コア高さ」が高くなると多工程プレス成形では成形が困難となる。この場合、適当に空を設けることにより、展開・収縮可能で、折り曲げ加工だけで複雑な立体構造を造れる折り紙コアを創成した。また、これまでの、ハニカムを代表とする静的な

コアでなく展開収縮できる円筒折り紙コア構造の開発も得られた。代表者の研究室で開発しているエネルギー最適制御(2011年自動車技術会論文賞)をこの展開・収縮コア構造に適用し、大きなエネルギー回収率を得る知的構造の開発をスタートさせている。さらに、折り紙の可展面をベースに弾塑性有限要素法を利用して得られる形状は菓子袋にシワを与えない包装機的设计に有用であることを示した。これらは当初の想定以上の成果である。

(3) 1) 全米優良図書出版賞に輝いた「形の幾何学」の集大成「Connections」、2)「平坦に折りたたむための条件」を満たしつつ、意図した構造をもった形に紙を折るためのTree Makerを開発したRobert J. LangやMITのEric D. Demaineらの折り紙幾何学、などは、日本発の折紙工学が参考とすべき欧米の研究成果の代表として挙げることができる。上記1)に対しては、明日の折紙工学を担う若手研究者中心に翻訳することを提案し「萩原一郎、宮崎興二、野島武敏監訳「デザインサイエンス百科事典—かたちの秘密をさぐる—」：朝倉書店」と題し、原著の不足分も補って本年5月に刊行されることとなった。2)のTree Makerを中心とする平坦折り紙幾何学に対し、折り畳んだ時に必ずしも平坦であることを要求しない立体折り紙を曲線折りの観点からまとめているのも想定外の成果である。

(4)「Connections」の共同訳者でもあり同じ研究会の仲間の三谷氏(筑波大)の、軸対称体の立体折りを、三宅一生氏がファッションに利用したとして話題になった。軸対称以外の立体折りを得るのは困難であったが、曲線折りから立体折りの検討ができる可能性を示し、新しいファッションやデザインに結び付ける礎を得た。以上、展開収縮可能という折り紙の特色を利用した構造体の開発を初め、剛体折り、立体折り、などに関しても世界最新の研究成果を上げ、更に飛躍できる可能性を示したのも予定以上の成果である。

#### 4. 今後の研究の推進方策

(1) ますます重要となる省資源・省エネルギーに対応すべくダイアコア、折り紙コア、展開・収縮コアの大規模構造物への適用技術の開発を行う。

①折り紙コアで突合せ溶接で十分な強度が得られない場合、フランジまで考慮した折り紙コアを創出し強度の向上を図る。

②これまでの単独の吸音・遮音、遮熱の検討を強度・剛性と合わせたトータルとしての最適構造の検討を行うとともに、汎用的な設計ハンドブックにまとめる。

③列車のフロア構造などはサンドイッチトラスコアパネルで進めている。4枚構成のパネルに対し、溶接と接着の複合接合を考え、強度、接着のしやすさとダイコアの切隅、面離などの折り紙パラメータとの同時最適化解析を進める。

(2) スマート構造の開発。①折り紙コアの接合部分に様々な機構を挿入したり、伸縮コアを随所に入れることにより太陽光や風向き等により最適な向きに変わる防音壁、遮熱壁、砂防壁等、②地震時や着陸するとき、衝撃アブソーバーが最適に機能するよう部分的に構造系が変化し、安全にしてスマートな構造創出の基盤研究。③構造物

自体が風などで微小に揺らぐことにより、エネルギーを貯蔵できる構造。以上の最適制御には我々の研究室で開発したエネルギー最適制御理論(2011年度自動車技術会論文賞)の利用を考える。④反転螺旋型折り紙コア構造に対しては、飲みほしたペットボトルの折り畳構造や、自動車車体の強度メンバーとしての実用化検討も合わせて行う。

(3) ダイアコアや円筒折り紙構造等の折り紙構造物は通常の構造物より複雑なため、計算モデル作成にはより多くの時間が必要となる。そのため、専用のCADシステムを開発する。

(4)「平坦に折りたたむための条件」を満たしつつ、意図した構造をもった形に紙を折るための「折り紙設計法」を与えるTree Makerを開発したRobert J. LangやMITのEric D. Demaineらの折り紙幾何学に対し、直線折りの延長として求めた曲線折りの理論構築により立体折り紙の一般化を目指し新しいファッションやデザインに繋げる。

(5) 一連の折り紙は、平成23年ニューヨークで展示と講演が求められている。そして平成24年には成果を発表することを目的に国際会議の開催を検討する。

#### 5. 代表的な研究成果

(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49件)

(1) S. Tokura, I. Hagiwara, A Study for the Influence of Work Hardening on Bending Stiffness of Truss Core Panel, J. Appl. Mech., Vol. 77/031010-1- 031010-6 (2010-5).

(2) 斎藤一哉, 野島武敏, 森村浩明, 萩原一郎, 新しく開発した軽量コアパネルの曲げ剛性の評価」日本機械学会論文集A編75巻750号(2009-2), pp. 259-265.

〔学会発表〕(計78件)

〔図書〕(計3件)

(1) 田端正久, 萩原一郎 監訳：計算力学理論ハンドブック、朝倉書店(2010.6).

(2) 萩原一郎, 宮崎興二, 野島武敏 監訳：デザインサイエンス百科事典—かたちの秘密をさぐる—、朝倉書店(2011.5).

〔解説・総説〕(計8件)

(1) 萩原一郎、特集のねらい—折紙工学の現状と課題、シミュレーション第29巻第3号(2010-9), pp. 80-81.

(2) Hagiwara Ichiro, From Origami to "Origamics", The Japan Journal, Vol. 5, No. 3(2008-7), pp. 22-25.

〔産業財産権〕

○出願状況(計2件)

(1) 名称：エネルギー吸収構造物  
発明者：萩原一郎、趙希録、胡亜波  
権利者：国立天学法人東京工業大学  
種類：特許権  
番号：2009-209858  
出願年月日：(2009年9月10日)  
国内外の別：国内

〔その他〕

<http://www.mech.titech.ac.jp/~h-souzou/>  
<http://sciencelinks.jp/content/view/656/260/>