

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

Research on the Manufacturing Method and Creating the Function of New Lightweight Core Structure by Fusion of the Origami Engineering and the Computational Mechanics

萩原 一郎 (Hagiwara ICHIRO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授



研究の概要

空間充填理論と折り紙操作で創成したダイアコアの安価なプレス成形法を確立し、総合的にハニカムコアに勝る、省資源・省エネルギー構造体の創成に役立てる。円筒折り等の展開収縮能を運動機構とする全く新しい概念の軽量折り紙構造体の開発を行う。従来の折り紙は直線折りであるのに対し曲線折り、立体折りに拡張しファッション性、デザイン性を高める。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

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. 研究開始当初の背景

ハニカムコアを代表とする軽量で高剛性のコア構造は、多くの産業で利用されている。しかし、コア構造の持つ、音響特性や遮熱性などの様々な機能特性、光と影の織り成す優れたデザイン性などは未だに有効に活用されていない。またハニカムコアは糊づけで製作されるため熱に弱く曲面化ができない問題もある。これまで新しい素材の使用や接着剤の改良等、様々な研究が行われてきたが、コストの面でハニカムと競合できるコアモデルは開発されていない。省資源の時代にあたり、コア構造は有効な軽量化手段として様々な工業品への利用が期待されるが、普及を図るためには上記の問題点を解決し、さらなる低コスト化を図らなくてはならない。

2. 研究の目的

折紙工学と空間充填理論によって得たダイアコアは「日本の折り紙の産業応用への大いなる可能性」としてNatureにも取り上げられた。この可能性ある折紙工学が産業応用されるためには安価な成形法の確立、機能の最適化が必要である。そこで本研究では、1) ダイアコアのテストピースを対象に計算力学を用いて強度・剛性、振動、吸音、遮音、遮熱特性などの機能の創出と成形法の確立。2) ダイアコアを中心に、取りうる全てのパターンを体系的に整理し、折り紙コアを創出しその成形法の確立。3) 円筒折り、円錐形状膜折り、円形膜折りを利用した展開、収縮コアの創出と成形法の確立。4) 連続した多角形、多面体からなる安定なコア構造の面を効果的に抜きとり、「空」の多面体、多角形を導入することで不安定化し、展開/収縮機

能が生じることを利用するインフレーター型の高剛性軽量コアの創出と成形法の確立。5) 上述のコア構造の建築フロア・壁、道路上の防音壁、都市のヒートアイランド現象緩和のための遮熱構造、運搬、組み立てが容易な折り紙ドームなどの多岐に亘る産業分野応用のための基盤研究を行う。

3. 研究の方法

日本応用数学会の「折紙工学研究会」、日本機械学会の産学官連携の研究会「計算力学援用による折紙工学の推進とその応用に関する調査研究分科会」を主宰し、共同研究者、連携研究者を含め関連する多くの研究者間で研究成果を議論し紹介しあうことにより産業界への啓蒙と、折紙工学の推進を行う。「折紙工学研究会」メンバー中心に8名で「シリーズ応用数理」の一環として「折り紙の数理とその応用」と題し刊行（本年8月発行予定）する。シミュレーション学会では「折紙工学」の小特集を設ける。更に、日本発の折紙工学が参考とすべき欧米の研究成果である、「ギリシャ・ローマ時代からの形の幾何学」を集大成した、全米優良図書出版賞に輝いた Jay Kappraff の大著「Connections」を共同で検討・翻訳し、不足も補って刊行する。その他、積極的に成果の論文化やマスコミに展開しながら折紙工学を確立する。

4. これまでの成果

(1) ダイアコアに関して：軽量にして強度・剛性が高いという折り紙の第1の特色を利用すべく、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トトラス（以降トラス）と称し、この

一様にコアが設けられる構造の場合、安価なプレス成形では中央部は周辺部から板の流入のない張出成形となるが、最外列では端部から板が流入することになる。この、場所によって成形条件が異なることが板の伸び量を変化させ、深い形状を成形した時の波打ちや反りの原因となった。そこで計算力学の援用により図1に示す最適な多工程成形法を世界に先駆け構築した。トラスコアとして、図2に示す2枚のパネル片を張り合わせたダブルトラスコアパネル、片側の1枚を平板にした曲面化及び接合が容易なシングルトラスコアパネルの2種類を開発した。シングルトラスコアの太陽電池パネル(図3)は実用化され、新聞に掲載された。さらにOAフロアに続き、ダブルトラスコアの新幹線床構造への利用検討も始めた。以上、ハニカムコアの1割から2割程度の製造費で熱に弱い、曲面化ができないという問題も解決し、ハニカムコアに総合的に勝るコアの開発を得た。

(2) 展開収縮可能という折り紙の第2の特色を利用したコア構造体の開発: 反転螺旋型円筒折り紙コア構造(RSC)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た。これは新しいアブソーバとして産業界から大いに期待され、雑誌に取り上げられた。(3) 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。

(4) 従来の折り紙が直線折りであり平面に展開できる平坦折りであったのを曲線折りであり立体折りに拡張し図4に示すような斬新な形が得られ新しいファッションやデザインに展開できる可能性を示した。(5) 上述の「Connections」を共同で検討・翻訳し、不足も補って、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)は本年5月に刊行されることになった。欧米の得意とする数理幾何学と日本の折り紙技術の融合を促進し折紙工学推進に極めて有用なものと期待される。

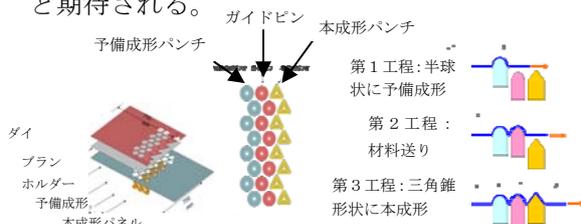


図1 多段工程成形シミュレーション

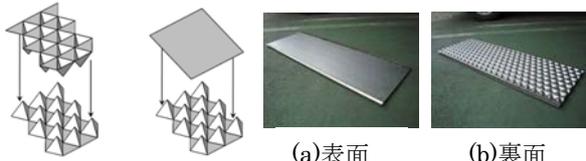


図2 2種類のトラスコアパネル

図3 実用化されたソーラーパネル

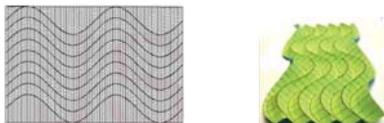


図4 円筒折りを繰り返して得たサインカーブ状折線を用いて得た立体折りモデル

5. 今後の計画

多工程プレス成形で得られるダイアコアが更に多くの産業分野へ適用されるための基盤技術の開発を行う。ダイアコアに適切に空を作り展開収縮を可能にしたコアや円筒折りなどの展開収縮能をもったコアに代表者ら開発のエネルギー最適制御理論と組み合わせ知的折り紙構造物の開発を行う。曲線折り、立体折り紙の理論体系を構築し、ファッションやデザインに役立てる。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- (1) I. Hagiwara, From Origami to Origamics, Japan Journal, Vol. 5, No. 3 (2008-7) pp. 22-25
- (2) A. G. Sorguc, I. Hagiwara, S. A. Selcuk, Origamics In Architecture: A Medium Of Inquiry For Design In Architecture, Journal Of The Faculty Of Architecture, Vol. 26, No. 2, (2009-12), pp. 235-247.
- (3) S. Tokura and I. Hagiwara, Forming Process Simulation of Truss Core Panel, Journal of Computational Science and Technology, Vol. 4, No. 1 (2010-3) pp. 25-35
- (4) 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).
- (5) H. Morimura, I. Hagiwara, General Design of the Forming Collar of the Vertical Form, Fill and Seal Packaging Machine Using the FEM, PACKAGING TECHNOLOGY AND SCIENCE Packag. Technol. Sci. (2010-11), pp. 1-17.
- (6) X. Zhao, Y. Hu, I. Hagiwara, Study on Crack Characteristics of Half Cut Type Vehicle Side Member Structure of Energy Absorption Ability by Using Origami Engineering, Journal of Computational Science and Technology, Vol. 5, No. 1, (2011-1), pp. 13-25.
- (7) 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)
- (8) 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(2011.4).
- (9) 萩原一郎: JACM Award for Computational Mechanics (2009.7)
- (10) 萩原一郎: 2009年度日本機械学会機械力学と計測制御部門研究業績賞
- (11) 萩原一郎、他2名: World Engineering Congress ベストペーパー賞(2009.8)
- (12) 萩原一郎: 2009年度日本機械学会計算力学部門功績賞(2009.9)
- (13) 齊藤一哉: 日本応用数理学会 2009年度若手優秀講演賞(齊藤一哉、野島武敏、萩原一郎、平面/空間充填に基づく軽量コアパネルの剛性、強度特性の講演論文に対して)
- (14) 萩原一郎: 日本応用数理学会フェロー賞(2011.4)
- (15) 萩原一郎、福島直人、他1名: 自動車技術会論文賞(2011.5)

雑誌論文: 49件、学会発表: 国内55件、国際: 23件、招待講演: 34件、著書: 3件、総説・解説: 8件、招待原稿: 12件、特許出願2件、新聞・雑誌: 11件ホームページ等
<http://www.mech.titech.ac.jp/~h-souzou/>
<http://sciencelinks.jp/content/view/656/260/>