社団法人　日本機械学会　産官学連携センター研究協力事業委員会所属
「RC235　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」

1　分科会名称

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

2　主査名

萩原一郎（東京工業大学大学院理工学研究科機械物理工学専攻教授）

3　設置期間

2008４月～2010 年３月までの２年間

4　研究目的・内容

研究者側委員の野島武敏教授により2002年に提唱された折紙工学は，2007年7月のネーチャー，続いて米国数学会誌で紹介され，野島―萩原の共同研究の成果は，日刊工業新聞，朝日新聞，外務省トレンズインジャパン，NHKサイエンスゼロ，そして科学技術振興機構のサイエンス・リンクス・ジャパンサイトの用語コーナーで，また6月12日のR25（アールニジュウゴ）で紹介された．更にジャパン・ジャーナルに掲載される．このようなことから，折紙工学は俄かに注目され，自動車メーカ，ゼネコン，車両メーカ，航空機メーカ，オフィス家具メーカなど多岐に亘る産業分野から多くのニーズが寄せられている．

更に独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構の「運輸分野における基礎的研究推進制度」の支援下のプロジェクト「超軽量車両の突破口となる技術の基礎的研究」では萩原を代表として図１に示すように，折り紙車体構造の開発検討を行っている．

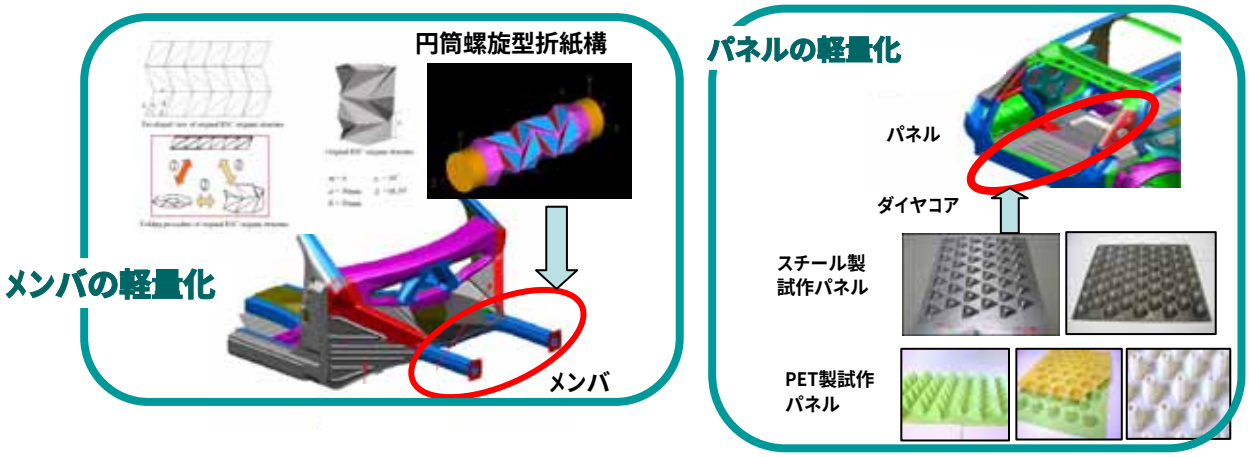

図１ 折り紙車体構造の開発検討例

また本年度から科学研究費基盤研究S「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」が萩原を研究代表として進められる．このように新しい学問である折紙工学はそれなりに認知されつつあるが，未だ研究フェーズと考えている企業が多く検討はされているようではあるが本研究会の入会は7社とまだ少ない．折り紙工学は図２のように様々な産業応用が可能なものである．これからでも間に合うのでより多くの企業の参加を期待する．

さて，本分科会では，研究者側委員の野島武敏教授が発明したダイアコア構造及び螺旋型円筒折紙構造をベースとする．

これらのCAD/CG化，CAEによる機能検討，ラピッドプロトタイピングによる試作，試作品のＣＣＤカメラやレーザースキャナなどによる形状チェック，その際，不良箇所があればCAD データの修正，塑性加工解析シミュレーションからなる計算折紙塑性加工学を扱う．

１） ダイアコアに関して

軽量で高剛性， 高強度を実現できるコア材料は， 航空機，宇宙機等の飛翔体にとってなくてはならないものである．加工技術の発展に伴いその用途も広がり，最近では自動車，鉄道車両，建築物等にまで利用が広がっている．しかし，コア構造の持つ， 防音，遮音等の音響特性や断熱性等様々な機能特性，さらには光と影との織り成す幾何学模様からくる優れたデザイン性などは未だに有効に活用されているとは言いがたい．また現在，市販されているこれらの軽量コアのほとんどは，アルミ箔，紙，プラスチックなどを接着剤で角柱状に接着成型して作られており，

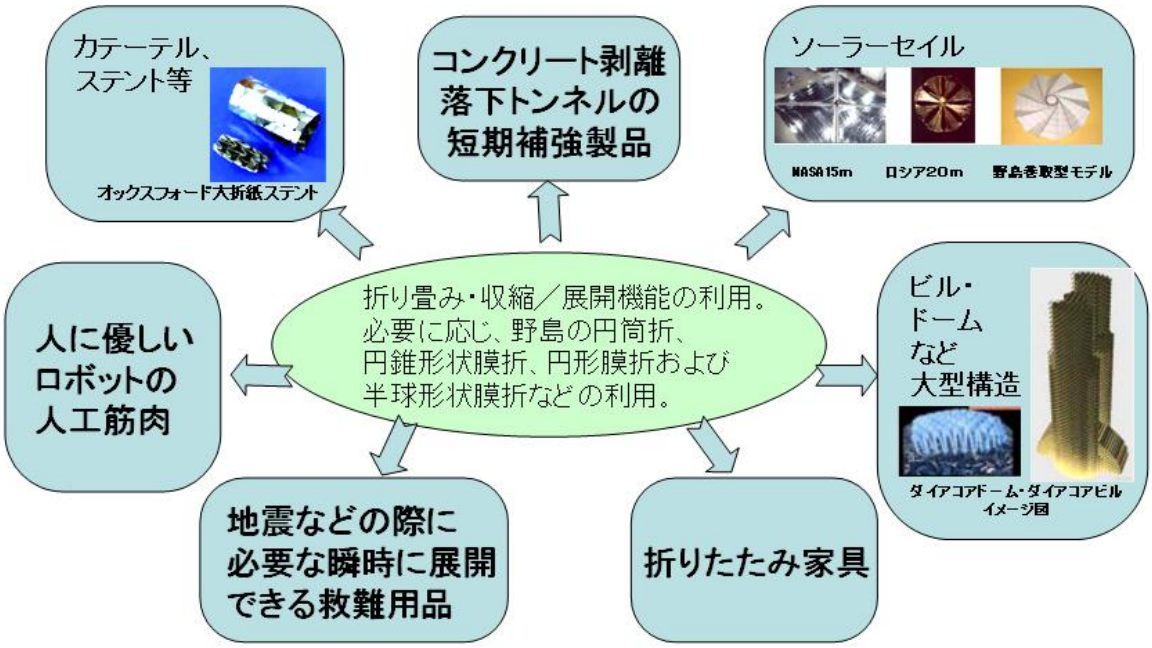

図２ 新しい工業製品の候補例

コア構造の強度が接着剤の特性に大きく依存し, 高温にさらされる部品には使用できない等の欠点がある．さらにコアパネルが高価格であることも，建材等への利用を妨げる大きな要因である．まずダンボール，波板等のコア材料は加工が簡単である反面，強化できるのは一方向のみの剛性であり，高度な構造的要請に答えるものではない．コア構造の代名詞とも言えるハニカムコアは，1949 年にアメリカの軍用機にはじめて初めて搭載され, 以来このモデルに関しては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. その一方でハニカム以外の新しいコアモデルの開発はあまり行われておらず，強度や剛性，コストの点でハニカムと競合することができ, 効率的な加工法のあるコアモデルは未だに開発されていない. 将来, 航空機や宇宙機器, 鉄道車両等にはこれまでにもまして軽量化が要求されると考えられ，また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．より普及を図るためには，上記の問題点を解決し，さらに低コスト化を図らなくてはならないが, そのためにはより簡便に作製できる新しいコアモデルの開発が必要である．本研究では，　コアの形を考える上で基本となる幾何学に立ち返ることで，ハニカムと競合しうる，幾何学的な平面/空間充填形を基にデザインする，　新しいコア構造モデルの創出，機能，デザイン性，加工法などの確立を目指すものである. ダイアコアとハニカムコアを比較して図３に示す．

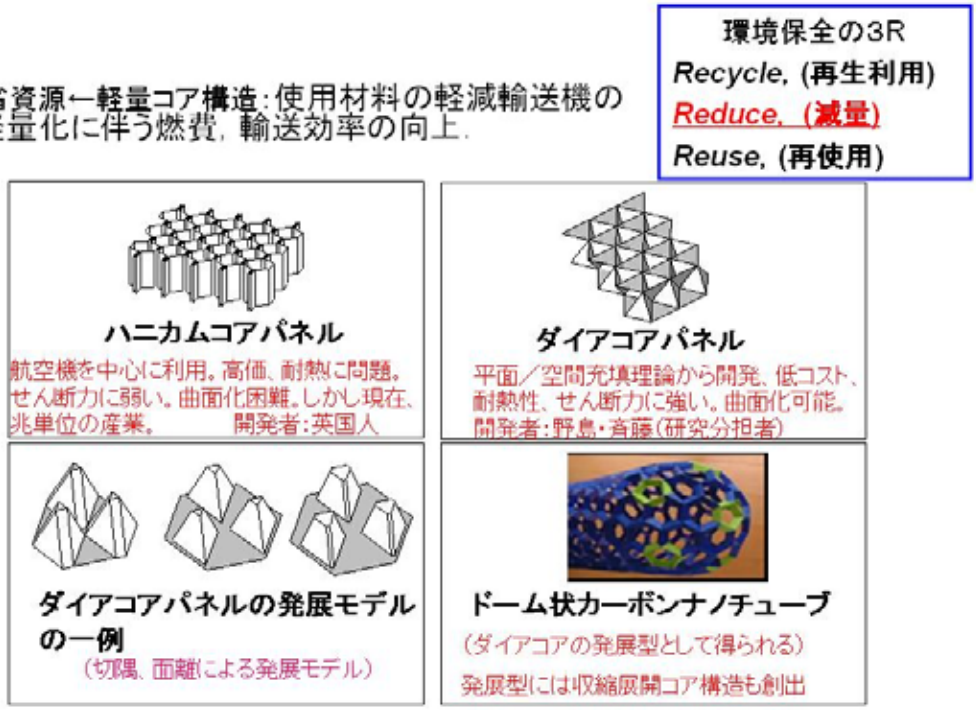

図３　コア構造の環境保全の位置づけ，ダイアコアのハニカムコアに対する優位性，ダイアコアの発展型コア

ハニカムコアは重量当たりのコア高さ方向の剛性が最も高いためロケット壁始め様々な所で利用され今や何兆円もの産業となっている．しかし，上述のようにせん断力に弱いため, 上下に平板を糊付けしてはじめて, 実用的になるため火災に弱い, 曲面化が難しい，高価であるという欠点を有す.

一方，幾何学の空間充填理論と折り紙操作で，野島-斉藤のによって発明されたダイアコアは，これらハニカムコアの欠点を全て解消している．更に切隅，面離，などの折り紙操作により様々な変形バリエーションが得られる. これらの新しい幾何学的形に強度・剛性，遮音，遮熱，光と影の織りなす幾何学的模様造形などの機能を与える研究を行うことも一つの目的である. 図４は二つのシングルコアの凹部と凸部を嵌め合わせてダイアコアが得られる様子とシングルコアが鋼板, アルミ材, PET材で造られた試作例を示している．シングルコア自体は板材などとスポット溶接付けで強固となり，ダブルコアともに通常の波板の３～５倍程度の強度・剛性を有す試験結果が得られている. シングルコア自体単独では非常に柔らかく図５のようにロケットのフェアリングなどに丸めて格納できる. そして必要なところで同図のように上下嵌め合わせることによって迅速にダブルコアにでき宇宙ステーションの枠などにも使用可能である. 図６は数値塑性折紙加工学の一例でプレス成形シミュレーションの様子を示す．図７は空を入れることにより，安定なダイアコアは不安定となり，収縮・展開が可能なことを示す．また，適当に空を入れることにより，ダイアコアも折り曲げで得られることを示している.

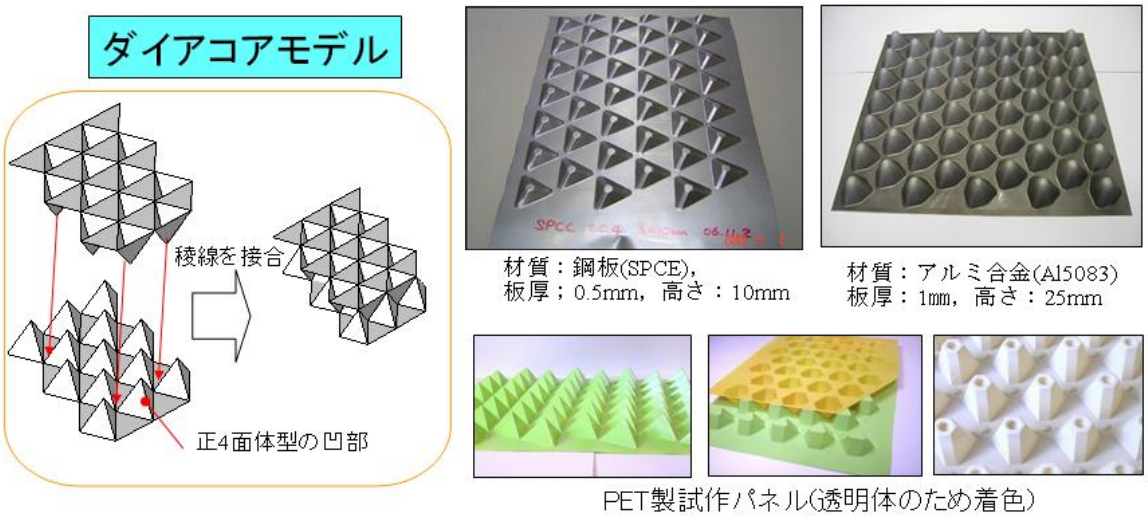

図４ ダイアコアの作成法とダイアコアの鋼板，アルミ合金，ＰＥＴ製の試作例

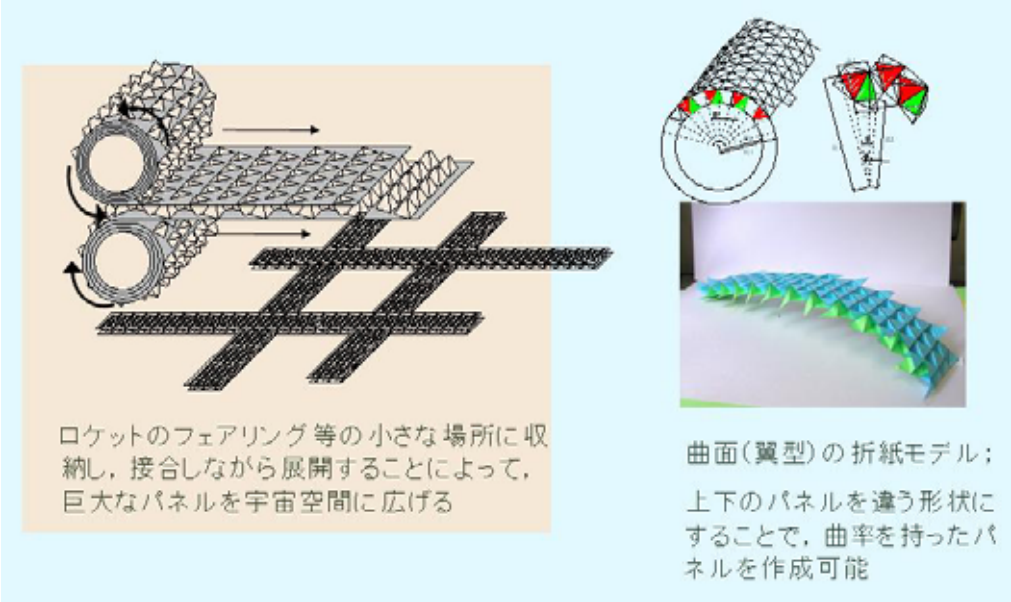

図５　宇宙構造への応用概念(ダイアコアの場合)

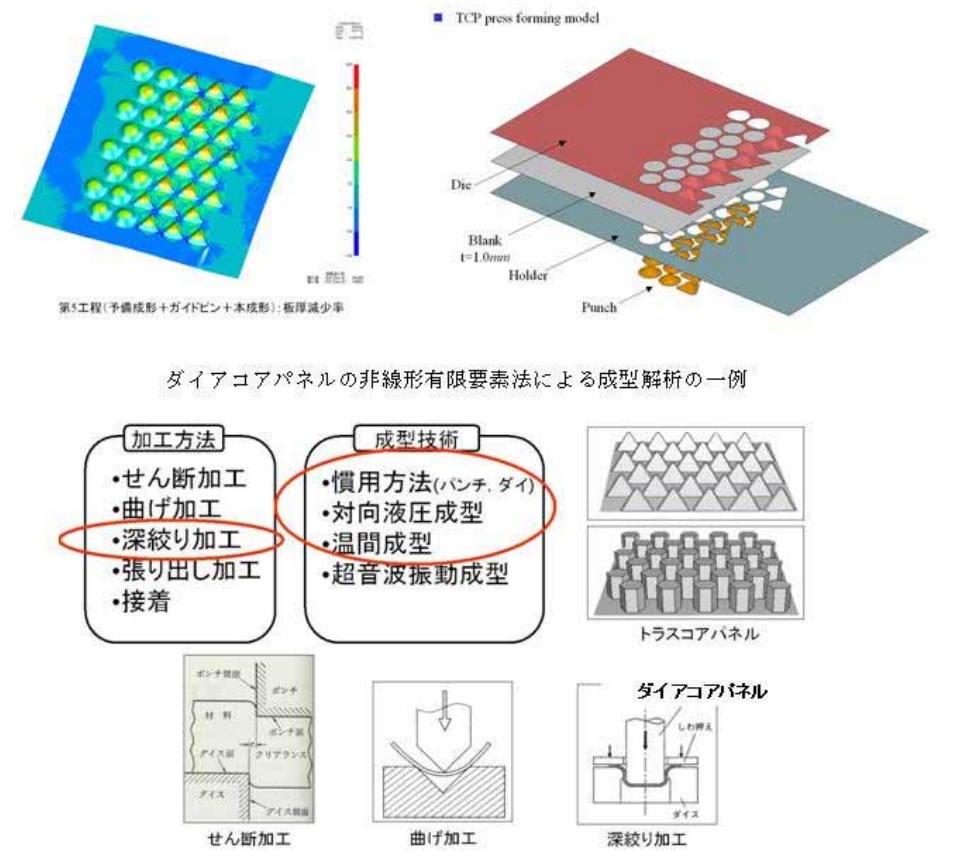

図６　計算折紙塑性加工学の開発例

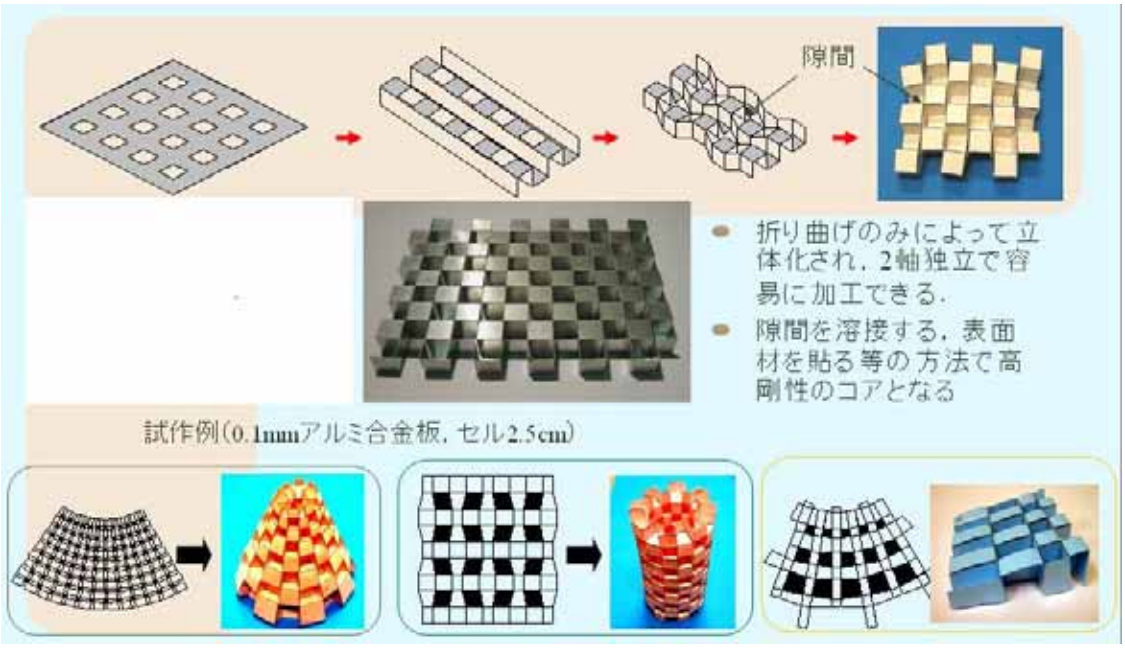

図７　折り曲げのみで得られる折紙コア

２）螺旋型円筒折紙構造に関して

図８に示す，平面折りから派生した反転らせん型の円筒折りの構造物はきれいに折りたたまれながら変形するため，従来の円筒，まるぼうや多角形断面構造物が自らの圧潰した嵩張りによる変形の限界に比べて変形量が大きいことを図9のように

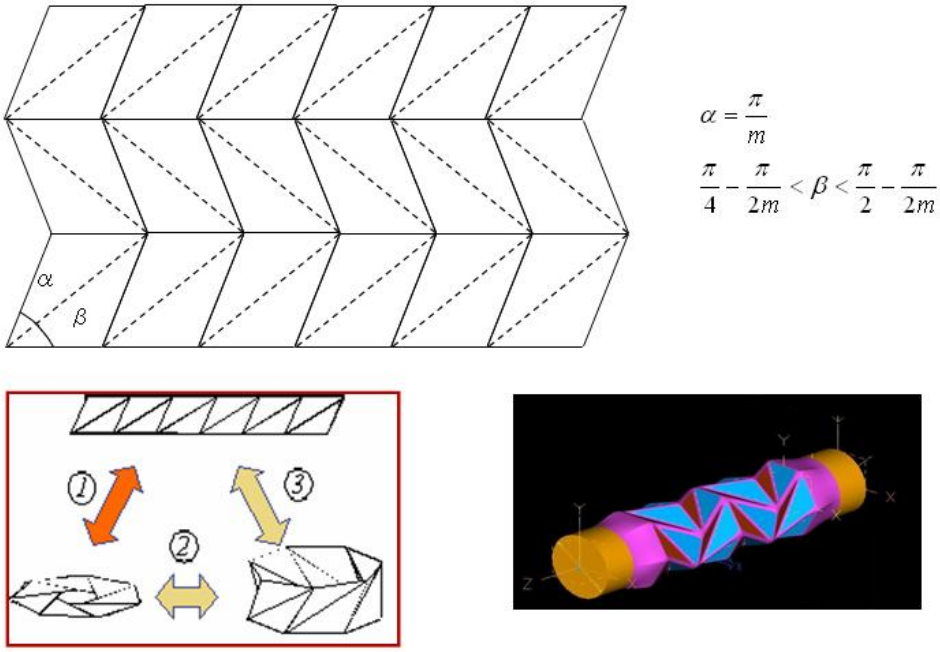

図８　正m角形の上下面を持つ円筒の展開図

シミュレーションで確認している．この特性を利用し，求められる機能に対して最適な円筒折り紙構造と製造法を開発することがも本研究の一つの目的である．

自動車の軽衝突や歩行者との衝突の際にはバンパーステーが，衝突の際にはフロントサイドメンバーの変形によるエネルギー吸収の寄与が最も大きいため，バンパーステーやフロントサイドメンバーに円筒折り紙構造の圧潰特性を利用することを考える．また，ペットボトルや缶に円筒折り紙構造を適応させることで図８の螺旋角βを適切にとることにより小さな荷重で小さく折りたたむことができ，回収コストや輸送コストの低減が期待される．

しかし，フロントサイドメンバーのような構造物においては，現状では折りたたみの容易さを追求したため圧潰荷重が小さいという問題点が存在する．そのため折りたたみ変形によるエネルギー吸収効率をあげるために圧潰開始後の最大圧潰荷重を抑えつつ圧潰開始荷重の大きい最適モデルを開発する必要性がある．それには，図１０に示すように，折れ線部を丸めることにより潰れ量は同じで反力を大きくす

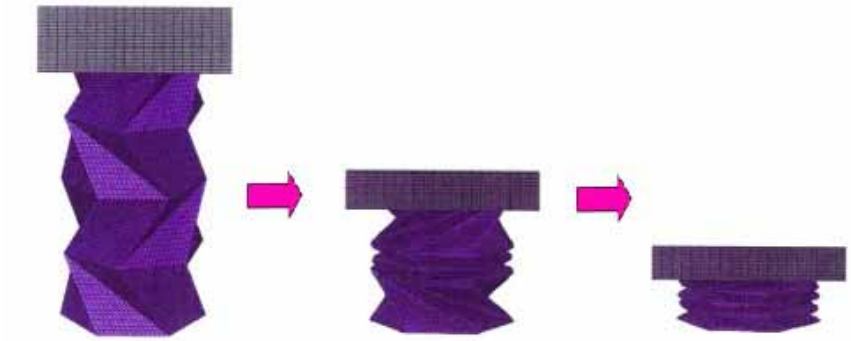

図９ 円筒折り紙構造の圧潰シミュレーション

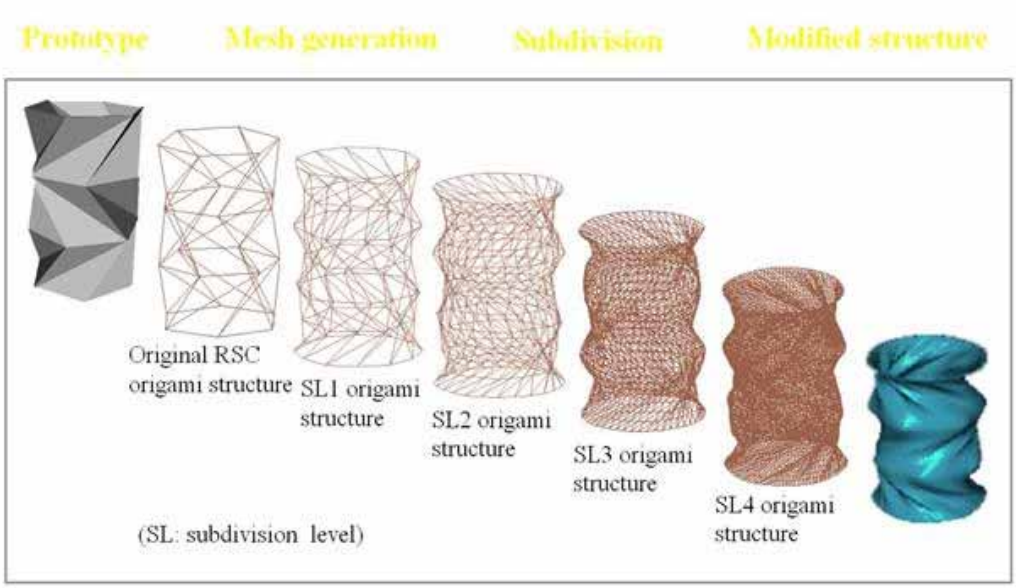

図１０　サブディビジョン法による反転ら旋型円筒折り紙構造形

ることが考えられる．また平板の代わりにシングルコアを円筒折り紙構造に使用できれば，より高い荷重が期待される．

３）研究の内容

反転らせん型円筒折り紙モデルにおける形状パラメータとエネルギー吸収率，圧潰荷重の関係を明らかにし，求められる機能に対する最適設計とモデルにおける解析精度の向上を図る．

【モデル形状の最適化】

円筒折りの手法はすでに萩原研究室によって一般化されており，角度βと底面の形状によって円筒全体の形状はほぼ決められる．折り線部に適度なRを付けることで圧潰開始荷重が大きくなる可能性があるため，Rをパラメータに加えた形状の最適化を行う．折り線部にRをつけることで成形加工が容易になるといった利点もある．また，圧潰荷重特性を向上させるために重量あたりの剛性に非常に優れているシングルコアパネルを利用できないかの検討も行う．

【解析精度の向上】

ハイドロフォーミングによって成形加工された折り紙構造を適応した円筒の試作を図１１に示す．ハイドロフォーミングによって円筒板厚は均等ではなくなる．そのため板厚分布や塑性変形による初期ひずみなどの影響も解析に取り入れることで解析精度の向上とこれによる構造の最適化と製造法の最適化が得られる．

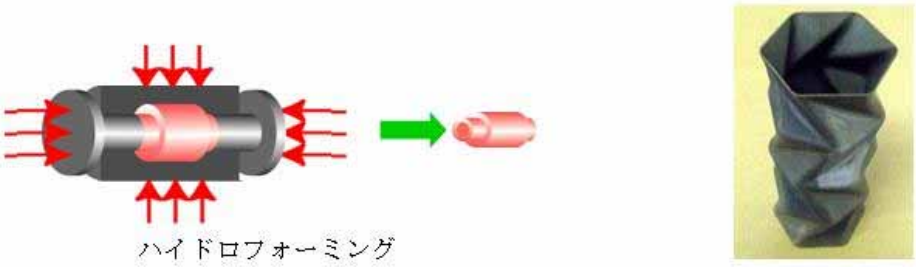

図１１ 円筒折り紙試作

【応用例】

・自動車のフロントサイドメンバー

背景で述べたとおり，フロントサイドメンバーに本研究を適用させることで歩行者との衝突時における歩行者のダメージの軽減，軽衝突した際にフロントサイドメンバーの折りたたみ変形によって衝撃エネルギーを吸収し後方部の部材の変形量を弾性変形領域で留まらせることで修理性の向上が考えられる．

・ペットボトルや缶製品
　ペットボトルや缶のように円筒構造をして，大量に消費されるようなものに円筒折り紙構造を適応させることで簡単にとても小さく折り潰すことができ，従来の構造のものと比べ一度に輸送できる重量，個数が増え回収効率が上がり輸送コストの面で有利になる.

5 期待される研究成果

工学的価値

(1) わが国伝統文芸の折紙に工学的価値を与える折紙工学の推進
(2) 複雑構造の加工法の技術開発に寄与する数理折紙塑性加工学の創出
(3) 幾何学的な平面/空間充填形を基にデザインする， 新しいコア構造の創出
(4) コア構造の持つ，防音，遮音等の音響特性や遮熱性等様々な機能の発現
(5) 光と影との織り成す幾何学模様からくる優れたデザイン性の発現
(6) 既存の角柱型のコアモデルとは全く異なる，正多面体，準正多面体の空間充填形や，捩れ多面体等の形を持つ新しいコア構造の機能，デザイン性の発現.
(7) 円筒折り紙構造の最適形状の創出

工業的意義

(1) ハニカム構造以上の機能を持つダイアコアの自動車車両，鉄道車両，宇宙航空機，高層建築など建築・土木構造物，などへの適用,
(2) 宇宙構造展開構造への適用,
(3) 折紙構造の熱，音響問題への適用,
(4) 接着剤で角柱状に接着成型されるアルミ箔，紙，プラスチックなどの軽量コアの有す，強度が接着剤の特性に大きく依存し，高温にさらされる部品には使用できない等の欠点の解消.
(5) 高価格であるがために建材等への利用が妨げられている問題の解消
(6) 優れた遮熱特性，優れた造形性を利用した都市部のヒートアイランド現象緩和と優れたデザイン性を兼ね備えた建造物の実現
(7) 円筒折り紙構造の最適形状の実現

6 研究活動の概要

「上期/第１年度（2008年４月～2009年３月）」
(1) ダイアコアの数理折紙塑性加工学の開発
・ 通常プレス法

・　２段階逐次成型法
・　温感成型法
(2) ダイアコアの機能創出
・　強度・剛性の最適構造
・　吸音，遮音特性の最適構造
・　遮熱特性の最適構造
・　デザイン性の検討
・　機能性とデザイン性の総合最適構造
(3) コア構造の産業への応用検討
・　自動車車両
・　航空宇宙構造
・　列車構造
・　土木・建築構造
(4)　円筒型折り紙構造の応用法の検討

「下期/第２年度（2009年４月～20010年4月）」
(1)角柱型以外のコアモデルの数理折紙塑性加工学
・　通常プレス法
・　２段階逐次成型法
・　温感成型法
(2) 角柱型以外のコアモデルの機能創出
・　強度・剛性の最適構造
・　吸音，遮音特性の最適構造
・　遮熱特性の最適構造
・　デザイン性の検討
・　機能性とデザイン性の総合最適構造
(3) 角柱型以外のコアモデルの産業への応用検討
・　自動車車両
・　航空宇宙構造
・　列車構造
(4)　円筒型折り紙構造の試作

７．参加負担金額（年額）　30万円

８．問合せ先 萩原一郎（東京工業大学理工学研究科機械物理工学専攻）

9　研究者側委員

主査　萩原一郎（東京工業大）
幹事　岡村宏（芝浦工大）
幹事　梶原逸朗（東京工業大）
委員　石濱正男（神奈川工科大）
委員　小机わかえ（神奈川工科大）
委員　施勤忠（宇宙開発事業団）
委員　野島武敏（東京工業大学）
委員　大島修造（東京工業大学）
委員　黄慶九（東京工業大学）
委員　田辺誠（神奈川工科大）
委員　轟章（東京工業大学）
委員　長松昭男（法政大）
委員　中原健志（九州産業大）
委員　福島直人（東京工業大学）
委員　古谷寛（東京工業大学）
委員　森村浩明（東京工業大学）
委員　安井位夫（東京工業大学）
委員　杉山文子（京都大学）
委員　栗林香織（東京大学）
委員　鎌田慶宣（新居浜浜高専）