樹脂製緩衝材の開発

寺田 耕輔,中野 実頼*,三谷 練*

Development of Plastic Buffer Material

TERADA Kousuke, NAKANO Mirai, MITANI Ren

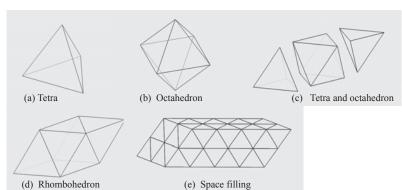
In recent years, there is a great need for lightweight, high stiffness structural technology that can realize fuel efficiency improvement as CO₂ reduction measures to prevent global warming. For example, honeycomb panel as lightweight and high stiffness panel is widely applied into various structure. However, honeycomb panel, which needs glue process, is very weak for shear stress and hot temperature. Also rapidly developing home delivery industries need reusable / absorption buffer materials. Therefore, innovative high stiffness structure technologies have been required. In response to these needs, Assembly Truss Core Panel (ATCP) by using origami forming, suggesting the possibility to make much wider range of structure than before has been developed, which was reported as lightweight, high stiffness structural technology in 2014. This paper presents not only PP (Polypropylene) shock absorbing buffers as reusable ATCP with no glue, but also studies based on experimental tests by using prototype ATCP and FEM analysis.

1. 緒 言

昨今においては、EC 市場が劇的に急増している。国土交通省の報告¹⁾ によると 2014 年で EC 市場は全体で 12.8 兆円規模であり、宅配便件数も 5 年間で約 4.7 億個 (+11%) 増加している。そのなかで輸送時に必要となる梱包や緩衝材を現行のように使い捨てではなく、資源の有効活用とごみ量削減のための環境問題の視点から再利用可能かつ耐久性に優れた緩衝材の開発が重要になってくると考えられる。また、地球温暖化防止対策のための環境問題として、

 CO_2 削減に向けた省エネルギー化の実現や構造物の安全性向上のために、軽量高剛性構造に関する開発のニーズも非常に大きい。これらのニーズに応えるため、2014年に組立式トラスコアパネル(ATCP: Assembly Truss Core Panel)が提案され、ATCPの試作と曲げ剛性評価結果について報告されている $^{2.3}$.

ATCP の特徴は、図1に示すように正四面体コアと正八面体コア (あるいは正八面体ハーフコア) を組立てることによって空間充填して高剛性化を図った構造体である. 使用する素材の材質や板厚などは適用される用途に合わせ





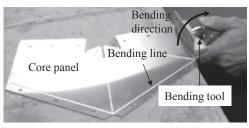


Fig.2 Bending process in origami forming

^{*)} 奈良工業高等専門学校 機械工学科

て選定し、図2に示すように素材を折り曲げて加工しコアを組立てる.

ここでは、構造強度および耐久性に優れた緩衝材として、樹脂製シートを利用した折紙工法⁴による ATCP からなる樹脂製緩衝材⁵⁾を提案する. なお、最近においては、樹脂製品がごみとして捨てられることによって、野生動物に悪影響を与えることを懸念した意見が報道されているため、ここでは紙製緩衝材も並行して開発する方針をとっている. 本稿では、開発のために行った試作、FEM(Finite Element Method)解析、剛性試験などから得られた知見について報告する.

2. 開発コンセプト

2.1 基本方針

現在,市販の紙製緩衝材としては,ハニカムパネル(図3)が知られているが,正六角形断面の柱が上下プレートに接着剤で接合された構造になっている。輸送用貨物コンテナの荷物の周辺に紙製ハニカムパネル(HCP: Honey Comb Panel)が緩衝材として活用されている。しかし、HCPは,接着剤を使用しないと上下プレートの柱が固定できないため,いろいろな方向から荷重を受けると柱が偏り,ついには緩衝材として機能できなくなる。このため,接着剤を不可欠とする HCP には次の欠点がある。

- ・温度上昇する環境では、接着剤の粘着力がなくなるため 使用に適さない.
- ・接着剤で固めているため、荷重を受けて損傷するともは や修復できず廃却となる.
- ・材料費として、接着剤はグラムあたりの単価が紙代の10倍から数10倍以上程度と非常に高価である.



Fig.3 Paper honeycomb panel



Fig.4 Sealed air buffer within cardboard

- ・接着剤を用いて形状凍結するため、形状自由度は低い.
- ・構造的に正六角形柱の軸方向からの圧縮荷重には強い が、いろいろな方向から荷重が作用すると弱い.
- ・接着剤を使用するため、HCP内に物品を格納するような ことは取り出しにくくなるから困難である.

他方として、市販の樹脂製緩衝材としては、樹脂製フィルム内の空間に空気を充填(Sealed air)して、その空気圧によるクッションを利用したタイプ(図 4)もよく利用されている。このようなタイプの緩衝材は、強い荷重が作用すれば樹脂製フィルムは簡単にパンクし、使用後はごみとして破棄されてしまうのが実際のところである。構造的に耐久性はほとんどない。このように HCP や Sealed air などの市販緩衝材は、使用前と後を通して、その形体を変化できるような自由度がないため。使用後は破棄せざるをえない。

そこで、ここでの ATCP 緩衝材の開発においては、接着 剤がなくても使用できること、折紙のように使用後は平面 状態に戻し再利用できること、用途に応じた様々な形体に 対応できること、いろいろな荷重条件に適応できるような 耐久性があることなどを基本方針としている.

2.2 折紙による形状凍結性

折紙をしたことがある人なら誰でも,紙を折ることによ って飛行機や鶴など様々な形体を創出した後、また平坦な 紙の状態にもどせることを経験している. 本開発では、接 着剤を使用せずに,必要な時に緩衝材としての形体をと ることができるように、この折紙による形状凍結性を利用 しており折紙工法と呼んでいる. 折紙のための折線加工 は、種々のメーカが市販しているようなカッティングマシ ン(図5)を用いる.カッティングマシンに、切断線と折 線の CAD 情報を入力し、折線においては素材厚さの半分 程度の深さまでカットする. 紙や樹脂製シートを利用し て, 折紙工法でコアを製作する際, どのようなフランジ形 状寸法であれば接着剤がなくてもコアとして形状凍結で きるかについて, 多数のフランジ形状寸法のコア展開図を もとに試作実験を行った結果、下記のような知見を得てい る. なお, ここでの樹脂製シートは, 加工性や耐久性に優 れた市販品としてよく知られているポリプロピレンシー



Fig.5 Cutter machine for origami

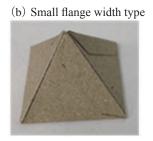
ト (PP:polypropylene) の厚さ $0.3,0.5 \, \mathrm{mm}$ を選定している. PP シートの単価は紙代とほぼ同程度で、紙に比較すると水に強く耐久性は大幅に向上する.

- (1) コアフランジ幅が長すぎると(図6(a)), コアを折り曲げる際にダンボール用紙が干渉し作業を行いにくく,かつ材料を必要以上に余計使い無駄である.
- (2) コアフランジ幅が短すぎると(図6(b)), 作成され たコアに荷重が作用するとフランジ面がコア面から





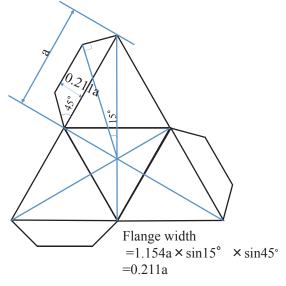




(c) Flange angle 60°type

(d) Appropriate type

Fig.6 Various flange type



(a) Deployment





(b) Paper core

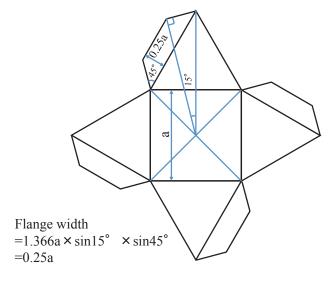
(c) PP core

Fig.7 Appropriate flange design for regular tetrahedron core

離れてくずれやすくなる.

(3) フランジ角は、コア面を形成している正三角形の一つ の角度 60°と同じであれば、折り曲げ角度の誤差等に よりコア辺上に段差(図 6 (c)) が生じるため、フランジ角度は 60°よりも小さい方がよい.

以上の知見をもとに、コア展開図を種々検討した結果、展開図の角度は三角定規の角度(30,45,60,90°)をベースにすると作図が行い易く、正四面体コアおよび正八面体ハーフコアの展開図(図7,8)においては、フランジ角を45°としコア底面重心位置とフランジ側辺が90°となるフランジ幅にすれば、上記の3つの項目が解決できることを紙やPPシートを折って見いだしている5.60.



(a) Deployment





(b) Paper core

(c) PP core

Fig.8 Appropriate flange design for regular octahedron half core

2.3 ATCPにおけるコアによる空間充填構造

正四面体コアおよび正八面体ハーフコア単体だけでは、緩衝材としての機能はないが、これらコアを多数用いて空間充填構造を組立てると衝撃荷重を吸収できる緩衝材となる。接着剤は不要であるが、多数のコアを包み込む格納用アウターは必要である。図9の例では、FEMモデルを用いて41個(=25+16)の正八面体ハーフコアと40個の正四面体コアにより空間充填した81個(=25+16+40)のコアからなるマットタイプATCPを示している。

ATCP の空間充填率 ϕ は、次のように定義している。 $\phi = \Sigma$ (構成する各コア体積) / アウター内部体積 図 9 の ATCP の正四面体と正八面体ハーフコアの各コア

1個の体積は、 $4.713a^3$ と $9.662a^3$ である。よって、81 個コアの総体積は $585.342a^3$ となる。いくつかのコアがなくても ATCP は構成できるが、 ϕ は 1.0 未満となる。例えば、図 9 の例で、正四面体コアが全てない場合、 ϕ = 0.68 のATCP 緩衝材となる。つまり、多数のコアで幾何学的に空間を完全充填していなくても、格納体の空間内を多数のコアがある程度充填されていれば、緩衝材として機能する。このような ATCP 緩衝材の各コア内部あるいはコア外の空

間に卵、野菜、お菓子、各種製品などを格納すれば、搬送時に必要なクッションマットとして活用できる。次に、図 10 の例では、正五角形筒(ペンタゴンタイプ)のなかに 10 個(=5+5)の正八面体ハーフコアと 5 個の正四面体コアにより合計 15 個のコアで空間充填した ATCP を示している。コア 5 個を円周方向に並べて 1 セットとしており、もっとセット数を増すこともできる。円周方向における正八面体ハーフコアの頂点における角度 θ は、約 70.6° であ

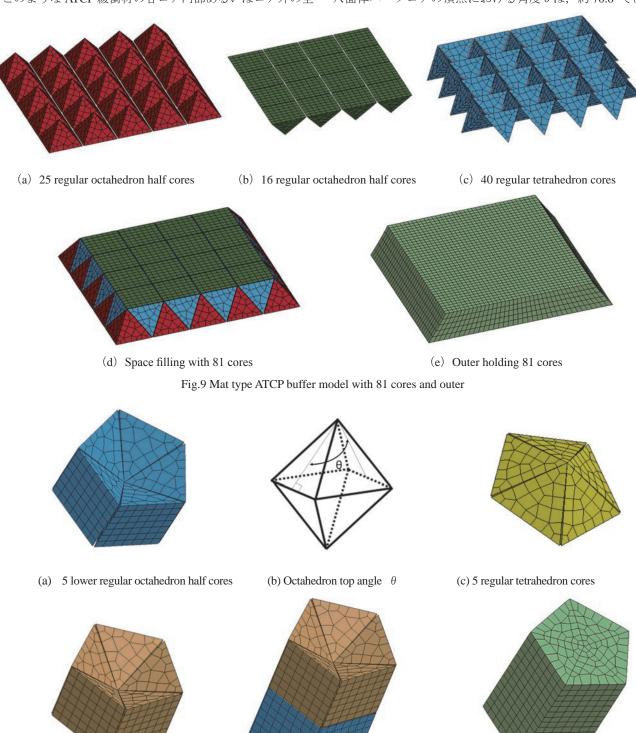


Fig.10 Pentagon type ATCP buffer model with 15 cores and outer

(f) Regular pentagon outer holding 15 cores

(e) Space filling with 15 cores

(d) 5 upper regular octahedron half cores

るから, 正八面体ハーフコア 5 個分で約 353° となり 360° に約7°満たない.しかし、実際上は板厚が寄与するため 空間充填率φほぼ1.0の ATCP 緩衝材として機能する. こ の正五角形の外接円の半径は0.866aであり、コアを構成 する板厚を t とすると、側面とフランジ面が各コア面に あるから、円周方向の板厚 20t (= $4t \times 5$) となる. 例え ば、a = 100 mm、t = 0.5 mm とすると、板厚分の角度は、 7° (= 360 × 4t/ (1.732a × π)) となる. また, 正五角形 の底面積は1.772であるから、正八面体ハーフコアの底 面積 a^2 の2個分よりも小さい底面積上に5個のコアが設 置されるから非常にコンパクトな構造である.

以上,このような ATCP 緩衝材を,様々な機械構造物や 各種搬送工程における再利用可能な衝撃吸収体、またはコ ア内部や外側の空間に食料や製品などを格納して搬送時 に利用することを提案している.

3.ATCP 緩衝材試作品事例

3.1 紙製マットタイプ ATCP 緩衝材

素材として紙は容易に入手でき利用しやすいので, 最初 の試作では素材として紙を適用している. 紙製のメリット としては、手軽に折紙加工できることに加えて多様な色彩 によるデザイン画などを印刷できることなどがあげられ る. 紙製緩衝材の ATCP を構成するコアの正三角形の1辺 の長さ a の設定では、折り曲げ作業のし易さと完成後の緩 衝材 (クッションマット) の厚さとして, 実用的に約50 mm がよいと考え、長さa=65 mm としている. 図 11 に 121 個のコアから構成される ATCP の組立手順を示す. 紙 製であるが、図12に示すように人間一人程度の荷重が作 用しても損傷しない. また, コア表面にユニークなデザイ ン画(図13)を印刷することもできる.

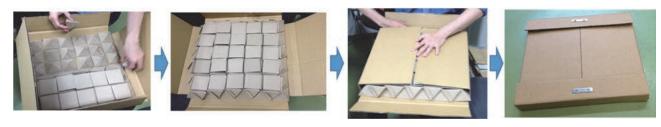


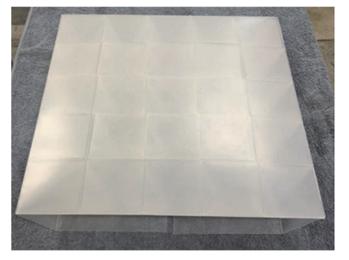
Fig.11 Paper ATCP buffer with 121 cores and outer box(size $410 \times 410 \times 55$, weight 600g)



Fig.12 Paper ATCP buffer loaded by a man



Fig.13 Printed various design on paper cores



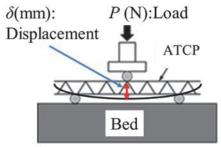


Fig.15 Three points bending mechanism

Fig.14 PP ATCP buffer composed with 81 cores and outer box (size $350 \times 350 \times 55$, PP sheet thickness 0.5mm, weight 634g)

3.2 PP 製マットタイプ ATCP 緩衝材

用途に応じて ATCP の材質を選定する必要があるが、紙よりも PP の方が強度、耐水性、耐久性等において優れているので、PP 製 ATCP は実用性がある。ATCP を構成するコアの正三角形の 1 辺の長さ a は、紙製の場合と同様に長さ a = 65 mm としている。図 14 に 81 個のコアで構成された PP 製 ATCP 緩衝材の事例を示す。この試作品では、PPシート厚さ 0.5 mm を使用し、図 15 に示すような 3 点曲

げ剛性試験を行っている。受け治具ロッド間隔は 250 mm としている。試験結果(図 16, 17)から,押付荷重 P=800N の荷重を受け荷重ロッド降下量 $\delta=70$ mm ほど撓んでもアウターの損耗はあるが PP 製 ATCP コアには再利用できなくなるような損傷は生じていない。

3.3 PP 製ペンタゴンタイプ ATCP 緩衝材

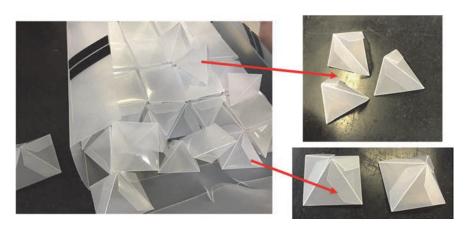
日常生活において現行の市販卵パッケージ(図18)を



(a) P=400 N



(b) P=800 N



(c) No damaged cores after bending test

Fig. 16 Three points bending tests for PP ATCP with 81 cores and outer (a = 65mm, PP thickness 0.5mm)

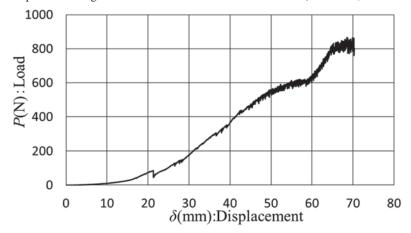


Fig.17 Measured data by three points bending tests for PP ATCP with 81 cores and outer (a = 65mm, PP thickness 0.5mm)



Fig.18 Current commercial egg package

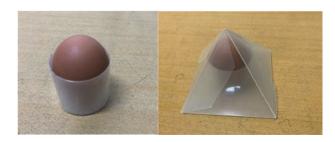


Fig.19 Egg in regular octahedron half core (a = 100mm)

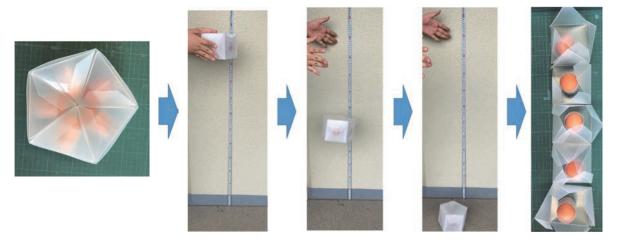


Fig.20 Drop test for PP Pentagon ATCP holding five eggs from height 1m

使用し卵を搬送中に、強い接触や落下させることによって 卵を割ってしまうこともある。現行の市販卵パッケージで は卵はわれやすく、使用後はごみとなり再利用されていな い.ここでは、卵がわれにくくかつ再利用できるペンタゴ ンタイプ PP 製 ATCP による卵パッケージを提案する.

図 19 に示すように、コアの正三角形の 1 辺の長さ a を 100 mm とすると卵を格納することができる.卵はコア内で静止できるように PP シートの輪を巻いている.PP シート厚 0.5 mm,正八面体ハーフコア 5 個とアウターからなる試作品は、質量 137g である.卵 5 個を格納した試作品(図 20)を、搬送中の落下事故を想定し、高さ 1m から落下させる実験を行ったところ、卵 5 個とも全て割れやひびなどの損傷はなく ATCP 緩衝材の有効性が認められる.

Table 1 Material constants

	E(MPa)	σ_{y} (MPa)	F(MPa)	n	ν
ſ	1000	20.0	30.0	0.1	0.4

(a) Three points bending test by FEM

4.FEM 解析と実験による剛性評価

4.1 FEM 解析手法

用途に応じて ATCP 設計変数(コア数,正三角形の1辺の寸法,材質,板厚等)を検討できるように,FEM 解析を用いた剛性評価を行っている。ここでは,PP 製 ATCPの3点曲げ剛性試験を対象とした FEM 解析モデル例を図21に示す。FEM 解析ソルバーは,市販ソフトである LS-DYNA(LS-DYNA Version 971 User's Manual,2012)を用いている。本解析は緩衝材の大変形現象を対象としていることから,陽解法で行っている。FEM モデル化では,格納用アウターおよびコアをシェル要素(完全積分シェル要素タイプ)で表し,材料モデルとして弾塑性体モデルを用いて,PP シートメーカの推奨値と文献 から表 1 の材料定数(ヤング率 E (MPa),降伏応力 σ ,(MPa),塑性係数

(b) View A

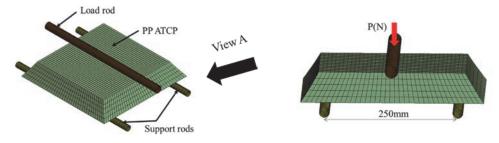


Fig.21 Three points bending test by FEM model for PP ATCP with 81 cores and outer

F (MPa),加工硬化指数n,ポアソン比 ν) を入力し、その他の材料定数はデフォルト値でミーゼス降伏条件を使用している.

3点曲げ剛性試験を対象とした解析モデル(図 21)では、図 14 に示した 81 個のコアからなる PP 製 ATCP 試作品を対象とした FEM モデルを表し、両サイドと中央の 3 つの丸棒治具を剛体モデルとしている。両サイドのサポートロッドの間隔は、3点曲げ剛性試験の実験条件と同じ250 mm としている。 両サイドのサポートロッドと PP 製 ATCP アウター" および"中央の荷重ロッドと PP 製 ATCP アウター" および"中央の荷重ロッドと PP 製 ATCP アウター"。" PP 製 ATCP アウターとコア、コア同士"等の接触を伴う変形問題はペナルティ法で解析し、摩擦係数および動摩擦係数等はすべて 0.1 としている。解析条件としては、両サイドのサポートロッドは完全位置固定とし、

中央の荷重ロッドを鉛直下方に降下させている. 荷重ロッドの降下量を δ (mm), 鉛直下方荷重をP (N) と表す.

次に、Fig.21 の PP 製 ATCP と同じ素材 PP シート厚 0.5 mm、ATCP コア高さと同じ HCP 高さ、同程度の全体質量、同程度の全体サイズ(横・縦寸法)となる仮想 HCP を想定し、その FEM モデル(図 22)を作製し、同様の FEM 解析手法によって 3 曲げ剛性試験を対象とした剛性評価を行う。PP 製 ATCP と仮想 HCP のモデル比較を表 2 に示す。PP 製 ATCP 試作品は実際に製作できているが、仮想 HCP モデル品を製作することはかなりの費用と工数がかかりそうで現実的には困難であろう。しかし、PP 製 ATCP 試作品と剛性特性を比較するために仮想 HCP も解析対象としている。

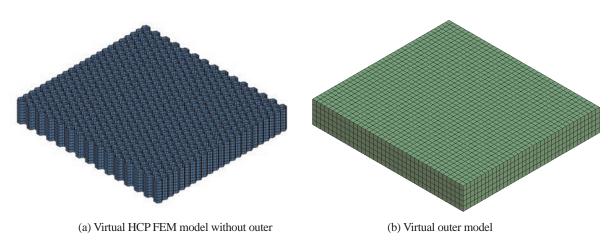


Fig.22 FEM models for virtual PP HCP

Table 2 Comparison between FEM model of PP ATCP and Virtual HCP without outer

	Number of cores	Total area of cores (mm²)	Size (mm)
PP ATCP	81	765958.7	$325 \times 325 \times 46$
Virtual HCP	653	758816.0	$320 \times 352 \times 46$

仮想 HCP の形状寸法サイズを,次の手順⁸⁾ から決定している.

- (1) 仮想 HCP の正六角形コアの基本レイアウトを図 23 のように表し、奇数行のコア列数は偶数行のコア列数よりも1つコアが多いものとする.
- (2) 列数をN, 行数をMと表し、行数Mは必ず奇数とし、M=2m+1 ($m=0,1,2,3\cdot\cdot\cdot$) と表す.
- (3) 上記 2 項の規則により、仮想 HCP コアの総辺数 6Nm+5N+m+1、総コア数 2Nm+N-m となる. 図 23 (b) の基本例では、N=4、m=2 であるから、コアの総辺数 71、総コア数 18 となっていることが確認できる.
- (4) コア辺長さをDとすると、(2m+1) 行×N列の HCP 全体サイズは 1.732DN×(3m+2) Dとなる. HCP 全体サイズを ATCP 全体サイズにほぼ等しくするためには、1.732DN = 325 かつ (3m+2) D = 325 である.
- (5) HCP コア総面積がATCPの81個のコア総面積765958.7 mm²にほぼ等しくなり、かつHCP高さをATCPコア高さ(46 mm = 65 mm × 0.707) に等しいとすると、HCPコアの総辺長さ≒765958.7 mm²/46

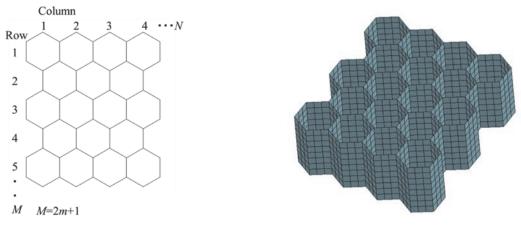
mm = 16651.3 mm とする必要がある.

(6) したがって、(6Nm+5N+m+1) D = 16651.3 となる いま D = 15 mm とすると、上記(4)より N = 13, m = 7 となり、(6Nm+5N+m+1) $D = 589 \times 15 = 8835 < 16651.3$

次にD=10 mm とすると、 " N=18, m=10 と な り、(6Nm+5N+m+1) D=1181 \times 10=11810 < 16651.3

次に D=8 mm とすると, "N=23, m=14 となり,(6Nm+5N+m+1) $D=1923 \times 8=16496 = 16651.3$ よって,D=8 mm のとき,仮想 HCP のコア総表面積と PP 製 ATCP のコア総表面積がほぼ等しくなっている.

上記の手順により、PP 製 ATCP 試作品とほぼ同質量、同サイズとなる仮想 HCP の仕様として D=8 mm, コア総数 653 個($=2\times23\times14+23-14$), 全体サイズ 320 \times 352 \times 46 等を決定している.



(a) Column *N* and Row *M* in virtual basic HCP

(b) Virtual basic HCP by FEM model (*N*=4, *m*=2)

Fig.23 Concept on virtual PP HCP

4.2 結果と考察

図 24 に FEM 解析による PP 製 ATCP の変形図とミーゼス応力分図、図 25 に仮想 HCP の変形図とミーゼス応力分布を示す。ミーゼス応力分布図のカラーレベルは全て統一している。図 26 に PP 製 ATCP 試作品を用いた 3 点曲げ剛性試験による測定結果、PP 製 ATCP と仮想 HCP についての FEM 解析結果等を示す。FEM 解析結果と実験から得られた知見は、次のとおりである。

(1) 仮想 HCP の場合,降下量 $\delta=15\sim25$ mm において押付荷重 P は約 800N くらいで横ばい(図 26)となり,素材 PP に発生する最大ミーゼス応力値(図 25)は25.9MPa で目安としている許容応力値 24MPa を超えている.この目安の許容応力値 σ_s の設定は、材料の

応力とひずみの関係式が $\sigma=F\varepsilon^n$ で表される場合、くびれ時のひずみ ε はn値で表されることから、 $\sigma_s=30\times0.10.1=24$ としている。仮想 HCP はP- δ 線の傾きが大きいことから剛性は高いと評価できるが、押付荷重P=800N以上の条件において使用すれば破損することが推測される.

(2) PP 製 ATCP の場合,降下量 $\delta = 25$ mm では PP 素材に発生する最大ミーゼス応力値は 21.9MPa 程度であり,降下量 $\delta = 50$ mm で P が 1000N を超えても最大ミーゼス応力値(図 24)は 23.8MPa であり許容応力値 σ s 以内である.したがって、PP 製 ATCP では、押付荷重 P = 800N では破損しないと考えられる.実際の PP 製 ATCP の 3 点曲げ剛性試験結果(図 16)でも、押

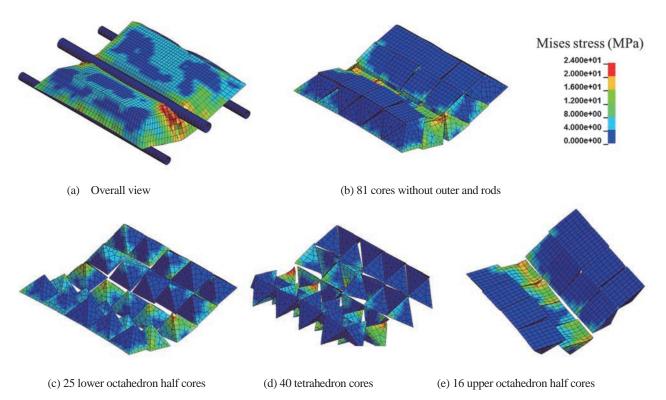


Fig.24 Mises stress distributions for PP ATCP at $\delta = 50$ mm (Maximum Mises stress 23.8 MPa)

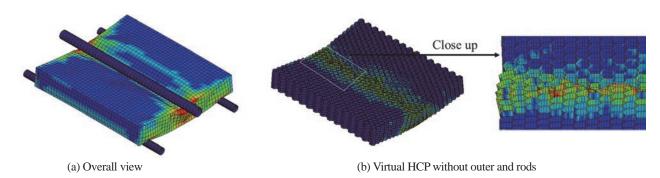


Fig.25 Mises stress distributions for virtual PP HCP at $\delta = 25$ mm (Maximum Mises stress 25.9 MPa)

付荷重P = 800N を超えても 81 個のコアに破損はまったく生じていない.

- (3) 仮想 HCP の方が ATCP よりも破損しやすい要因としては、押付荷重により変形が生じた際、HCP を構成する正六角形コア群は配置を変えられないが、ATCPは大変形するとコア配列が変形形状に合わせて隙間分布が生じる分だけ移動できる組立構造(図 24)であるため、局所的な応力集中を回避できるから破損しにくいことが要因として挙げられる。HCP は圧縮変形には強いとされているが、3 点曲げ剛性試験では、押付荷重 P=800N が負荷した場合、仮想 HCP は破損するが、PP 製 ATCP はしなやかに変形して破損しな
- い利点があることが実験と FEM 解析からわかる.
- (4) PP 製 ATCP の 3 点曲げ剛性試験結果と FEM 解析結果 (図 26) を比較すると,同じ押付荷重 P = 800N において,試作品は $\delta = 65$ mm であるが,FEM 解析結果では $\delta = 43$ mm 程度と小さい.これは試作品のコアとコア間の隙間が作業上は,FEM モデルよりも少し広くなる傾向があるため,試作品の方が撓みやすいことと,FEM モデルのコアは一体物であるが,試作品のコアは折り曲げているだけで一体物ではないため,試作品の方が FEM モデルよりも剛性が小さくなることが要因と考えられる.

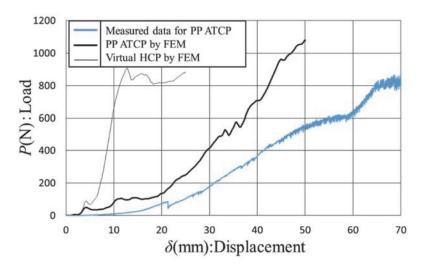


Fig.26 FEM results and measured data by three points bending tests

5. 結 言

ここでは、樹脂製 ATCP 緩衝材を提案し試作品を製作し、剛性試験と FEM 解析を行い、得られた知見について報告している。ATCP 緩衝材試作品は、HCP や Sealed air などの市販緩衝材に比較して、接着剤を使用せずコアによる空間充填構造であるため、形状自由度が高く耐久性があり製作コストが安く再利用しやすいし、使用後はもとの平面状態に戻してしまうことができるなど非常に多くの利点がある。ATCP のコア内部および外側の空間に多種多様な農

作物、食料品、工業製品などを格納して搬送時の緩衝材として、また ATCP を機械構造物や各種搬送工程における衝撃吸収体としても利用できると期待している。ここで提案した以外の様式による ATCP 緩衝材の開発も含めて、これらの実用化を目指して研究開発をさらに進めていきたい。

参考文献

(1) 国土交通省物流審議官部門 物流政策課企画室, "宅配の再配達削減に向けた検討について", 2016.11.25 発表資料.

- (2) 寺田耕輔, 佐藤秀俊, 牧田哲暢, 高橋徹, 萩原一郎, "組立式トラスコアパネルの開発:", 福島工業高等専門学校研究紀要,55,1-5,(2014).
- (3) 寺田耕輔,戸倉直,佐藤秀俊,牧田哲暢,萩原一郎, "組立式軽量高剛性構造パネルの曲げ剛性評価",日本機械学会論文集,No.15-00039,Vol.81,No.828,DOI: 10.1299/transjsme.15-00039,(2015).
- (4) 寺田耕輔, 萩原一郎, "自由自在な折紙のような工法", 日本機械学会誌 119-1175, 564-565, (2016).
- (5) 寺田耕輔, 戸倉直, 高橋徹, 萩原一郎, "組立式トラスコアパネル (ATCP) の実用化開発", 福島工業高等専門学校研究紀要, 58, 1-8, (2017).
- (6) 萩原一郎, 寺田耕輔: 特願 2017-166169.
- (7) Kousuke Terada, Kota Kadoi, Sunao Tokura, Takamichi Sushida, Ichiro Hagiwara, "The deformation mechanism on origami-based foldable structures", International Journal Vehicle Performance 3 (4) 334-346, 2017.
- (8) 寺田耕輔,萩原一郎,"折紙工法による紙/樹脂製緩 衝材の開発",日本機械学会 機械力学・計測制御部 門講演会講演論文集,18-7,No.243,(2018-8).