新しく開発した軽量コアパネルの 幾何学的パターンと機械的特性の関係*

斉藤 一哉^{*1}, 野島 武敏^{*2}, 萩原 一郎^{*3}

Relation between Geometrical Patterns and Mechanical Properties in Newly Developed Light-Weight Core Panels

Kazuya SAITO^{*4}, Taketoshi NOJIMA and Ichiro HAGIWARA

^{**} Department of Mechanical Sciences & Engineering, Graduate Student, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550 Japan

Dia-Core is a newly devised core panel formed by gluing/welding two same shaped panel pieces which have periodical indents. It has good cost performance due to easy press forming. Therefore, it is expected to become new core material which can be compete with honeycombs from the total points of view. The basic model of Dia-core is based on Octet-Truss developed by Fuller, and it consists of tetrahedra and octahedra. By varying the geometrical patterns that appear on the panel surfaces, various shaped modified models are devised systematically. In this paper, it is clarified that these pattern variations can be ruled by two geometric parameters, truncation [k] and separation [s]. Next, by numerical simulation using FEM, effects of these two parameters on the representative properties of Dia-Core, bending and in-plane shear rigidity, are clarified.

Key Words: Modeling, Structural Design, Product Design, Octet-Truss, Honeycomb Core, Structural Analysis, Finite Element Method

1. 結 言

ハニカムコアや各種発泡材料などの人工物から天然に見られる蜂の巣や骨、珊瑚等の構造まで含め、セル構造体は様々な優れた機械的特性、機能特性を持つことが古くから知られており⁽¹⁾、特にハニカム構造に関しては、材料力学的解析から衝撃緩衝特性の研究、更には音響特性や熱的特性等の機能特性に関する研究まで様々な研究が行われている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。しかしながらハニカムコアは製造プロセスが複雑できわめて価格が高いほか、接着剤を用いるため耐熱性に限界があることや耐せん断性に欠けることなど問題も多く、更なる汎用化は困難であると思われる。著者らは、コア構造を様々な製品にまで更に広く普及させ上記の優れた特性を有効に利用するためには、低コストで簡単に製作で

きる新しいコアモデルの開発が必要であると考え、幾何学的な空間充填形、平面充填形⁽⁵⁾⁽⁶⁾に基づき様々な新しいコア構造をモデル化してきた⁽⁷⁾⁽⁹⁾。中でもオクテット・トラス構造に基づきモデル化された「ダイアコアパネル」⁽⁸⁾⁽⁹⁾は塑性加工によって安価に製作可能であり、実用化されれば簡単な軽量化手段としてこれまでハニカムを利用できなかった製品に対しても広汎な利用が期待できると考える。

このコアの特徴は、表面の幾何学的なパターンを変化させることで正4面体と正8面体型のセルを持つ基本モデルの他にも様々な形状の発展モデルを設計できる点にある⁽⁸⁾⁽⁹⁾。セル構造体の特性はセルの大きさよりその形状に大きく依存することが Gibson らによって指摘されており⁽¹⁾、それゆえ多様なセル形状を持つダイアコアパネルは様々な機械的特性や機能特性を有すると思われる。これらの様々な特性とコアモデルの幾何学的パターンとの関係を精査することで、様々な工学的ニーズに対応できる汎用型のコアパネルを開発できると考える。このような意図のもと、本論文では

* 原稿受付 2008 年 5 月 20 日。

^{*1} 正員, 東京工業大学大学院理工学研究科 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

^{*2} 正員, 東京工業大学イノベーション研究推進センター。

^{*3} 正員, フェロー, 東京工業大学大学院理工学研究科。

E-mail: saito.k.ap@m.titech.ac.jp

特に幾何学的パターンの変化に伴いパネルの曲げ剛性、面内せん断剛性がどのように変化するかを明らかにすることを目的としている。これらの特性は、コアパネルをデッキパネル等の構造体の床面や、壁構造等の側面に用いる際に重要となる。しかしながら、ダイアコアパネルのセル形状と表面パターンに関しては、幾何学の平面充填形の理論に基づき体系化する方法がすでに報告⁽⁸⁾⁽⁹⁾されているものの無数にあるモデルの形状の差異を数理的に取り扱う方法は報告されていない。要求される機械的特性、機能特性に対する最適な形状を実験や数値解析によって求めるためには、これらの無数にあるコアモデルの形状を数理的に表す適切なパラメータ設定することが必要不可欠である。そのため、本報告ではまず平面充填形の変形概念に基づきコア形状や表面パターンなどの幾何学的パターンを表す新たなパラメータを設定し、形状の異なる様々なモデルをひとつのグラフの上で評価する。次に、有限要素解析を用い上記のパラメータの変化がパネルの曲げ剛性と面内せん断剛性にどのような影響を与えるかを解析することにより、高い剛性を得られるコアモデルの幾何学的パターンを明らかにする。

2. モデル

2-1 基本モデル 図1にダイアコアパネルの基本モデルを示す。図1左の様に3角形のグリッド上にひとつ置きに4面体型の凹部を設けた2枚のパネル片を対向させ、2枚のパネルの角錐の稜線が一致するように貼り合わせると、パネルの間には8面体型の中空部が連続的に生成され安定なコアパネルとなる。パネルの設計変数として、表面の正3角形の底辺長をセルサイズ c 、パネル片の板厚を t 、表面から凹部頂点までの高さを凹部深さ d で定義する。パネル高さ h は d と2枚の板の厚さ $2t$ の和になる。また、凹部深さ d のセルサイズ c に対する比を扁平率 f として定義する。

Fig.1 Basic model of *dia-Core*. Setting a panel on a reversed panel (bottom one) and gluing/welding at the apexes of pyramids to vertexes of the tiling in bottom panel, highly rigid core panels are manufactured.

2-2 発展モデルの一般形 ダイアコアの発展モデルとは、基本モデルの表面パターンを切隅、面離、2重切り、振り切り、シフトと呼ばれる操作によって連続的に変化させる過程で得られるコアモデルであり、基本モデルと同様にパネル片2枚を対向させ貼り合わせることで安定なコアパネルとなる⁽⁸⁾⁽⁹⁾。基本モデルが4面体と8面体で構成されるセル構造体であるのに対して発展モデルのセル形状は3, 6, 12角形を含む角錐や角錐台等の様々な形状を持つが、金型製作の容易さなどを考慮すると高い実用性を持つモデルは以下の3種に集約される。図2にこれらの発展モデルの一般形を示す。(a)は凹部底面と頂点が共に3角形、(b)は底面が6角形で頂点が3角形、(c)は底面と頂点が共に6角形の発展モデルであり、それぞれ3-3型、6-3型、6-6型と呼ぶ。これらの凹部をそれぞれ決まった平面充填形にしたがって配置することで、同形のパネル片2枚を対向させたときに凹部同士の稜線を一致させることができる。また、これらのモデルの特別な場合として、図3のような角柱型のモデルがある。(a),(b)は共に凹部が3角柱であるが表面パターンが異なり、それぞれ正3角形と正6角形によるアルキメデスの充填形と3角形による正充填系となっている。一方(c)は凹部が6角柱であり、表面は6角形による充填形となっている。これらをそれぞれ3角柱A型、3角柱R型、6角柱型と呼ぶ。凹部が3角柱であるモデルはA型、R型の2種のみであるが、6角柱型には6角形の形状の違いによって様々なモデルが存在する。

これらの発展モデルは基本モデル表面の正充填形を変化させることで得られ、その過程でコアモデルの幾

Fig.2 Three types of modified *dia-core* models. (a): 3-3 type. (b): 6-3 type. (c): 6-6 type.

Fig.3 Prism type models. (a): 3-prism *Archimedean* type. (b): 3-prism *Regular* type. (c): 6-prism type.

何学的パターンが様々に変化する。そのため発展モデルの形状を表すためには、これらの平面充填形のパターンを表す新たなパラメータを導入する必要がある。

2-3 面離パラメータ $[s]$ 図4(a), (b)はそれぞれ3-3型と6-3型モデルのパネル片表面の平面充填形と凹部の形状を表している。灰色で示してある3角形A, 6角形Cは凹部底面であり、これらに挟まれた3角形B, Dに対向するパネル片の凹部頂点を一致させ貼り合わせることでコアパネルが製作される。点線は凹部をすべて4面体とした場合の基本モデルの底面(正3角形による正充填形)を表しており、この1辺の長さがセルサイズ c となる。

3-3型の平面充填形は基本モデルの凹部底面の正3角形を重心の位置を変えないまま縮小することで得られ、この縮小した3角形の辺長 a のセルサイズ c に対する比を、新たに面離パラメータ $s(=a/c)$ として定義する。 s を小さくするにつれて凹部の形状は角柱に近づき、 $s=0.5$ で3角柱A型となる(図5(b)→(a))。

3-3型とは逆に、基本モデルの3角形を重心の位置を変えないまま拡大した場合、隣り合う3角形同士が重なり3角形Dができ、6-3型の平面充填形が得られる。3-3型と同様に、拡大した3角形の辺長 a のセルサイズ c に対する比を面離パラメータ s で定義する。 s の増加に従い3角形Dは拡大していき、 $s=2$ でコアモデルは3角柱R型となる(図5(c)→(e))。

面離パラメータを導入することにより、3-3型、6-3型のすべての発展モデルを一つの s で表すことが出来

Fig.4 Tiling patterns and indents shapes of 3-3 type and 6-3 type modified models. Separation parameter $[s]$ is defined as a/c (a : enlarged or reduced triangle length. c : cell size).

Fig.5 Difference in form of 3-3 type and 6-3 type models by Separation parameters.

る。図5に3-3型、3-6型モデルの例とそれぞれの s の値を示す。基本モデルは $s=1$ となり、 $0.5 < s < 1$ が3-3型、 $1 < s < 2$ が6-3型となる。

2-4 切隅パラメータ $[k]$ 6-6型発展モデルの形状は基本モデルや3-3型、6-3型の凹部の角を切り落とすことで得られる。これは表面の平面充填形に対し切隅⁶⁾と呼ばれる操作を行うことに相当する。3-3型を切隅した場合の平面充填形と凹部の形状を図6(a)に、6-3型の場合を(b)に示す。ここで、6角形A', C'は1辺 a の正3角形の3つの角を長さ b だけ切り落とした形状をしている。切隅の割合を示すパラメータとして、図のように切り取られた角の長さ b に対する元の正3角形の辺長 a の比を切隅パラメータ $k(=b/a)$ で定義する。図7に $s=1$ の6-6型モデルの形状が k によってどのように変化するのかを示す。 k の増加に伴い凹部の形状は角柱に近づき、モデルは6-6型から6角柱型まで連続的に変化する。

ある面離パラメータ s を持つ6-6型モデルにおいて切隅パラメータ k の値の範囲を求める。図6のように、6角形A', B'の頂点e, f, gと6角形C', D'の頂点e', f', g'を定めると、各点間の距離は、

$$\overline{ef} = (c-a) + b = (1-s+ks)c \quad (1)$$

$$\overline{fg} = a - 2b = (s-2k)c \quad (2)$$

$$\overline{e'f'} = b - (a-c) = (ks-s+1)c \quad (3)$$

$$\overline{f'g'} = a - 2b = (s-2k)c \quad (4)$$

で表される。まず底面が正3角形の3-3型は $k=0$ となる。ここから切隅を進めると6角形A'とB'が同形と

Fig.6 Tiling patterns and indents shapes of 6-6 type modified models. Truncation parameter $[k]$ is defined as b/a (a : enlarged or reduced triangle length. b : cutting length).

Fig.7 Difference in form of 6-6 type models ($s=1$) by truncation parameters.

なる点でモデルは角柱型となる。このとき $ef=fg$ が成り立つことから $k=(2s-1)/3s$ となる。よって、 $0.5 < s < 1$ の 6-6 型モデルの場合、 k の取りうる範囲は $0 < k < (2s-1)/3s$ となる。一方、6-3 型は底面が六角形であり、図 4(b)より $b=a-c=(s-1)c$ が成り立つため $k=(s-1)/s$ となる。六角柱型となる k の値を求めると、 $ef=f'g'$ より $k=(2s-a)/3s$ が成り立つ。よって、 $1 < s < 2$ の 6-6 型モデルの場合、 k 値の範囲は $(s-1)/s < k < (2s-1)/3s$ となる。これらの関係を図 8 に示す。上の曲線が角柱型モデル、下の直線と曲線がそれぞれ 3-3 型と 6-3 型($s > 1$)を表しており、これらに囲まれた領域が 6-6 型モデルである。また直線と曲線の交点はそれぞれ正則、準正則なパターンを持つモデルである基本モデル、3 角柱 R 型、A 型に対応している。

k と s を変化させることで 3-3 型、6-3 型、6-6 型のすべての発展モデルを表すことができる。平面充填形や凹部の形状などのパネルの幾何学的パターンを変化させるこれらのパラメータを幾何パラメータと呼ぶ。

3. 幾何パラメータと機械的特性の関係

3-1 数値モデルと解析条件 幾何パラメータの変化がパネルの曲げ剛性及び面内せん断剛性に与える影響を明らかにするため、板厚、セルサイズ、大きさが同じで k, s の値のみ異なる多数の数値モデルを製作し、汎用数値解析ソフト ANSYS を用い微小変形の範囲で静的解析を行う。まず解析に用いる数値モデルと解析条件に関して述べる。

解析するモデルは 3 角形 3 節点のシェル要素で構成されており、凹部が縦に 6 列、横に 5 列並んだ大きさでパネルサイズは 200×207 [mm] である。現在アルミ合金や鋼板で試作されているパネルを基にセルサイズ

Fig.8 Core type changes according to two geometrical parameters, k and s . Curves of $k = (2s-1)/3s$, $k = (s-1)/s$, line of $k=0$ ($0.5 < s < 1$), and the area surrounded them corresponding to prism type, 6-3 type, 3-3 type and 6-6 type.

は 40 [mm] とし、凹部深さ (パネル高さ) は基本モデル ($s=1, k=0$) の凹部がほぼ正 4 面体となるように 32 [mm] ($f=0.8$) とする。材料はアルミ合金製パネルを想定しヤング率 E は 72000 [Mpa]、ポアソン比は 0.3 で計算している。2 枚のパネル片は凹部稜線と頂点で接合されているとし、接合面も含め板厚はすべて 1 [mm] で等しい。これらの値や条件は k, s の異なるすべてのモデルにおいて同様に設定されている。

数値モデルの例として $k=0.2, s=1$ の 6-6 型モデルの概観を図 9 に示す。

曲げ剛性を求める際の境界条件を図 10(a) に示す。ここでは 3 点曲げ試験を想定し、パネルの x 方向両端下部の z 方向自由度を拘束、さらに剛体移動を防止する目的で両端の支持線の中点の y 方向自由度をそれぞれ固定し、パネル中央線に z 方向に一定の強制変位 (1 mm) を与え、接点反力の合計値から剛性値 (荷重/変位) を求める。

x, y 方向に対する面内せん断剛性を求める際の境界条件を図 10(b), (c) に示す。それぞれ片方の端部の自由度をすべて拘束し、向かい合う端部に横方向の強制変位を与え反力から剛性値を求める。

曲げ及び x 方向せん断については対称条件を用いることで要素を半分にすることが可能であるが、今回の解析では 3 つの境界条件に対して同一のモデルデータを利用し、対称条件は用いず全体モデルで解析する。

Fig.9 An example of simulated models (6-6 type model ($s=1, k=0.2$)) and their specification.

Fig.10 Restraint conditions in numerical simulations. (a): bending test (b): x-direction shear test (c): y-direction shear test.

Fig.11 Deformation diagram in numerical simulation. (a): bending. (b): x-direction shear. (c): y-direction shear.

総要素数, 総接点数は k , s の値によって異なり, それぞれおよそ 20000~25000, 10000~15000 である。

シミュレーションで得た曲げ, せん断の変形の様子の一例をそれぞれ図 11(a),(b),(c)に示す. 図中の要素の色の濃淡は荷重をかけた方向への変位の量を表しており, 曲げ, せん断変形共にパネル全体が一様板のように変形していることがわかる。

3-2 幾何パラメータと曲げ剛性, 面内せん断剛性の関係

$s=0.6$ から $s=1.8$ まで, それぞれ異なる面離パラメータを持つ 3-3 型, 6-3 型および基本モデルの形状を切隅によって少しずつ変化させながら, 曲げ剛性とがどのように変化するかを調べる. 得られた剛性値と切隅パラメータの関係を s ごとに示したものが図 12 である. グラフ上の太点線で示してある様に剛性値を示すそれぞれの線の左端が 3-3 型や 6-3 型モデルであり, 右端が角柱型モデルである. 図 12 より同じ面離パラメータ s を持つモデルで比較すると曲げ剛性と切隅パラメータ k はほぼ線形的関係にあり, 角柱型に近いモデルほど高い剛性を示すことがわかる. この剛性値の変化は s の値の低いモデルほど小さくなり, 特に $s=0.6$ では k の違いによる曲げ剛性の変化は殆ど見られない. また, これらの結果を基に $k-s$ 平面上に曲げ剛性を表す等高線を描くと図 13 を得る. この図から s が小さく k が大きいモデルほど高い曲げ剛性を示すことがわかる. また等高線の間隔は横方向の方が密になっており, 曲げ剛性を高くするためには k を大きくするよりも s が小さくなるように形状を変える方が効果的であることがわかる。

同様にして幾何パラメータと x 方向の面内せん断剛性の関係を調べた結果を図 14, 15 に示す. 図 14 より s の小さいモデルでは切隅パラメータの増加と共に剛性値は減少するが, s の大きいモデルでは逆に増加することがわ

Fig.12 Relation between bending rigidity and truncation parameter $[k]$ in each separation parameter $[s]$.

Fig.13 Contour lines of bending rigidity on $k-s$ surface.

Fig.14 Relation between in-plane shear rigidity and truncation parameter $[k]$ in each separation parameter $[s]$.

Fig.15 Contour lines of in-plane shear rigidity on $k-s$ surface.

かる。 $s=1$ 付近では一度減少した後に増加し、その最小値は $k=0.1$ 付近になる。また図 15 を見ると面内せん断剛性が最小となる形状は $s=1.5$ 、 $k=0.3$ 付近にあり、この点から離れるほど高い剛性を示すことがわかる。

3-3 面内せん断変形に対する異方性 面内せん断に対する異方性を調べるため、 s の異なるいくつかの 3-3 型、6-3 型モデル及び、異なる k をもつ $s=1$ の 6-6 型モデルに関しては y 方向の面内せん断剛性も解析し、 x 方向の剛性値と比較した。3-3 型と 6-3 型モデルについての結果を図 16 に、6-6 型モデル($s=1$)についての結果を図 17 に示す。図 16、17 より、どのような k 、 s に対しても x 方向、 y 方向のせん断剛性はほぼ同じ値を示しており、面内せん断剛性に異方性は殆ど見られない。

4. 考 察

本パネルを表面材とコア材からなるサンドイッチ構造と見なした場合、パネル片の凹部はコア材、凹部間の未加工領域は表面材にあたり、この表面材は周期的に穴の開いた平板とみなせる。この表面材の面積とパネル表面全体の面積の比(表面比と呼ぶ)は幾何パラメ

ータによって決まる。ここで、ハニカムコア・サンドイッチパネルと同様に曲げ変形において曲げ応力の大部分を表面材が支えていると仮定すると、表面比が大きいほど曲げ剛性は増加すると予想される。実際、図 5、7 からわかるように、表面比は切隅パラメータが大きいほど、面離パラメータは小さいほど大きくなり、この傾向は数値解析で得られた剛性値の変化のそれと一致している。

面内せん断変形に対しては、表面比の効果に加えてコア材(凹部)の剛性の影響も大きく関係すると考えられる。6 角柱のセルは横方向から簡単に折りたたまれるため凹部の形状が角柱型に近づくほど面内せん断剛性は低くなると予想される。解析で得られた結果を考察すると、切隅の初期に剛性値が低下するのはコア材の剛性低下が影響しており、その後剛性値が再び上昇するのは曲げ剛性と同等に表面比が増加することにより、表面材の剛性が上昇するためと考えられる。

今後の研究において実験や更なる数値解析を用い、強度特性を初めとする他の機械的特性を解析するとともに、ハニカムコアとの定量的な比較を更に詳しく行う予定である。

5. 結 言

新しく開発したダイアコアパネルとその発展型モデルについて、平面充填形の変形概念を基にその形状を表す 2 つの幾何パラメータを新しく定義し、これらのパラメータがパネルの曲げ剛性と面内せん断剛性に与える影響を調べた。得られた結論は以下の様にまとめられる。

(1) 図 2 に示されるダイアコアの 3-3 型、6-3 型、6-6 型発展モデルの幾何学的パターンは、切隅パラメータ k と面離パラメータ s の 2 つのパラメータを用いることですべて表すことができる。

(2) パネルの曲げ剛性は、 s 値が小さく k 値が大きいモデルほど高く、 s 値の同じ持つモデルで比較すると k 値と曲げ剛性の間には線形の関係があり、角柱型モデルで最も高い値を示す。

(3) パネルの面内せん断剛性は方向に依存せずほぼ等方的とみなすことができ、 $s=1.5$ 、 $k=0.3$ 付近のモデルでもっと小さくなる。

成形性が良く角柱型に近い形状のパネルが加工できる PET 製パネルなどでは、曲げ、せん断共に幾何パラメータを変えるだけで基本モデルから最大で 2 倍近くまで剛性を上げることができる。現在のところ深い凹部の加工が困難な金属パネルについてはモデルの成形性を考慮しなくてはならないものの、剛性を向上させ

Fig.16 Difference of in-plane shear rigidity between x -direction and y -direction in 3-3 and 6-3 type models.

Fig.17 Difference of in-plane shear rigidity between x -direction and y -direction in 6-6 type models ($s=1$).

るのにモデルの幾何学的パターンを変えることが有効であることが示された。

謝 辞

本研究は平成 19 年度科学研究費補助金(特別研究員奨励費 19・5987), 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」, 理工学振興会平成 20 年度研究助成の援助を受けてなされた。ここに深甚なる感謝の意を示す。

文 献

- (1) Gibson, L. J., Ashby, M.F., *Cellular Solid : Structure & Properties*, (1988), Pergamon Press.
- (2) Sato, K., *Department & Application of Honeycomb Core Materials & Sandwich Structures*, (2002), pp.271-271. JMC Publish.
- (3) Bitzer, T., *Honeycomb Techonology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing*, Chapman & Hall.
- (4) McFarland, R. K., Jr., Hexagonal Cell Structures under Post-Buckling Axial Load, *AIAA journal*, Vol.1, (1963), pp.1380-1385
- (5) Kappraff, J., *CONNECTION*, (1990), Chapter 5,10, World Scientific.
- (6) Hitotsumatsu, S., *Analysis of Regular Polyhedron* (in Jananese, *Seitamentai wo toku*), (2002), Tokai Library.
- (7) Nojima, T., Saito, K., Development of Ultra-Light Core Structure, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series. A, Vol.49, No.1(2006), pp.38-42.
- (8) Saito, K., Nojima, T., Modeling of New Light-Weight, Rigid Core Panels, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series A, Vol 73, No735, (2007), pp.102-108.
- (9) Saito, K., Nojima, T., Development of Light-Weight Rigid Core Panels, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol.1, No.9, The Japan Society of Mechanical Engineers.