

# 光環境制御装置としての斜角型ハニカムコアの特性の分析

## —積算日射量と輝度分布の観点から—

成枝 大地

### 1. はじめに

#### 1-1. 研究の背景と本研究の位置づけ

ハニカムコア (Honeycomb Core: 以下HC) は航空機や建築物に用いられる、軽量で高強度な構造体として知られている。HCの新たな設計法として、斉藤らは日本の伝統的な折り紙と切り紙の技術を活用して、任意断面を持つHCを展開図によって設計する手法を提案している<sup>[1]</sup>。この設計法により、任意の孔角度とパネル厚のHCパネルを容易に製作できる。パネル面に対して垂直な孔をもつ従来のHC(図1-1-a)と区別するために、これを斜角型HC(図1-1-b, c)と呼んでいる。

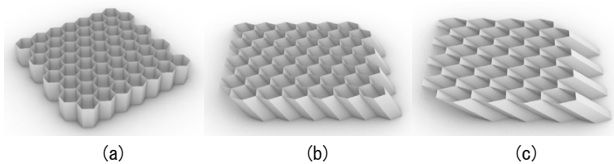


図1-1. ハニカムコア (HC) (a) 90° (b) 55° (c) 35°

この斜角型HCをフスマとして導入している事例があり(図1-2)、正面から反対側は直接見えないが、孔内部での反射によりぼんやりと反対側の様子が分かり、見る角度を変えれば内部が直接見えるという特徴がある<sup>[2]</sup>。ここから、斜角型HCの厚みや孔の角度を調節すれば、光環境の制御にも活かせるという着想を得た。

また、酒井らはフラクタル図形を用いた日除けを提案しており<sup>[3]-[9]</sup>、時間帯や季節に応じた日射遮蔽と日射取得の制御を実現している。さらに、春田はこのフラクタル日除けによる平行光の拡散性を輝度分布を解析することで明らかにする研究を行っている<sup>[10]</sup>。酒井らはフラクタル日除けの改良を繰り返す中で、フラクタル日除け自体をトラス状に組むことで別途の構造フレームを不要とする10SIRモデルの開発に成功している<sup>[3]</sup>。環境制御装置が構造体を兼ねることによって、建築意匠性と経済性の改善を実現している。

これまでHCの構造的性能や製法に関する研究は行われてきたが、環境制御装置としての研究は行われていない。主に構造体としてしか見られてこなかったHCの環境制御能力を分析することは、新たに建築の構造と環境制御を一体で担う装置を開発する上で大きな意義を持つ。



(a) 正面 (b) 斜め45度  
図1-2. 斜角型ハニカムパーテーション (写真: 八代写真事務所)

#### 1-2. 研究の目的

地球上では、地軸の傾きの影響で季節により太陽軌道や気候が変化する。昼光照明に天空光を取り入れるパッシブな建築設計手法を考える場合、一般的には夏場の日射を遮り、冬場の日射を取り入れるのが定石である。また、日射を制御すると同時に、グレアの発生を抑えることも必要である。そこで、斜角型HCを用いて季節ごとの日射を選択的に取得または遮断することで、建築の構造と環境制御を一体で担う装置の実現が可能になる。本研究では、太陽軌道や気候データをもとに解析を行い、光環境制御装置としての斜角型HCの特性を明らかにすることを目的とする。

#### 1-3. 研究の方法

斜角型HCのパネルに平行光を当てると、孔角度(以下 $\theta$ )とパネル厚(以下T)(図1-3-a)、光源の位置次第でHCパネルを透過する光の量が変化する。本研究では、斜角型HCの $\theta$ 、T、太陽軌道をパラメータとするモデリングを行う必要がある。そこで、3次元CADソフトであるRhinceros上で動作するGrasshopperを利用して、パラメータを組み込んだモデリングを行う。積算日射量や輝度分布の解析シミュレーションをする必要があるため、これらのシミュレーションを実行可能なLadybugとHoneybeeを用いる。

また、斜角型HCの光環境制御能力の特徴を調べるために、斜角型HCと同様の条件で2種類のルーバーを用いた解析を行う。斜角型HCと同じ間隔で板を東西方向に配置した平行ルーバー (Parallel Louver: 以下PL) と同間隔で板を南北方向にも配置し、グリッド状にしたグリッドルーバー (Grid Louver: 以下GL) の2種類を用意する。斜角型HCと同様にルーバーの板角度( $\theta$ )とパネル厚(T)を変数として設定する(図1-3-b, c)。

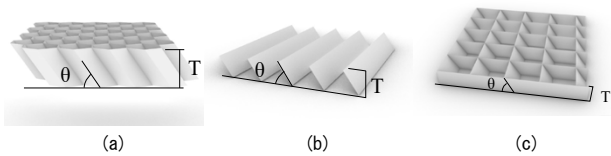


図1-3.  $\theta$ : 孔(板)角度 T: パネル厚 (a) 斜角型HC (b) PL (c) GL

## 2. 解析概要

本研究では以下の3種類の解析を行った。2-1.では斜角型HCを屋根材として水平に設置した場合の積算日射量を解析し、GLと比較する。2-2.では、幾何学的特徴を最大限に活用するため、パネルの取り付け角度を考慮して解析を行い、パネルの設計法に関する考察を行う。2-3.では輝度分布解析を行い、GL、PLと比較することで、斜角型HCによるグレア低減や輝度分布調節の特性を明らかにする。

### 2-1. 積算日射量の解析

斜角型HC、GLそれぞれによる積算日射量の制御能力の解析を行う。2-1.(1)では、斜角型HCを用いて、夏季(6月)と冬季(12月)の日射遮蔽率の差を最大にする形状を明らかにする。夏季の日射遮蔽率から冬季の日射遮蔽率を引いた値が大きいほど、夏場の日差しを遮蔽し、冬場の日差しを取得できていると判断できる。2-1.(2)では、同様の解析をGLについても行う。

#### (1) 斜角型HCの日射制御

福岡市(2005年)の6月1日~6月30日と12月1日~12月31日の積算日射量のデータをもとに、日射遮蔽物を置かない場合と斜角型HCを置いた場合の1か月の積算日射量の解析を行う。

斜角型HCの1つの孔を $\theta$ とTを変数にしてモデリングし、解析面をその孔の最下面とする。なお、このとき孔の軸方向に対して垂直な面で孔を切断した際の切

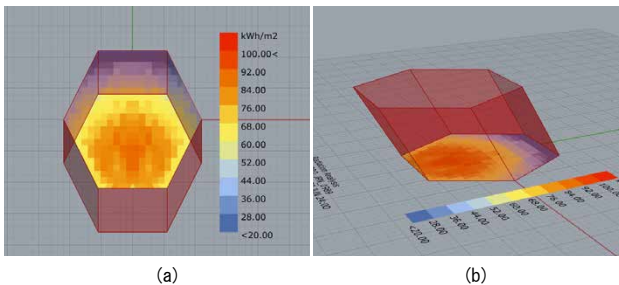


図2-1. 斜角型HCの積算日射量解析 (a) 真上 (b) パース

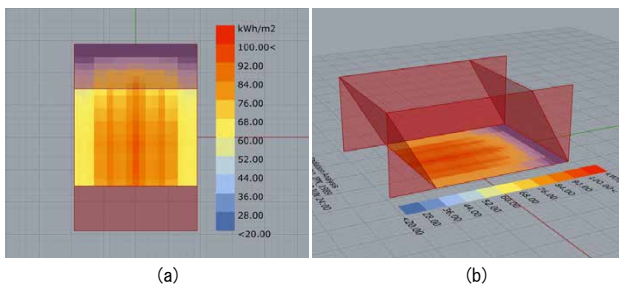


図2-2. GLの積算日射量解析 (a) 真上 (b) パース

り口の断面は常に正六角形であり、この1辺を11mmと定義する。 $\theta$ を任意の値とするとき、Tの値を1mmずつ変化させ、解析面に到達する積算日射量を得る。このデータから日射遮蔽率を算出し、その $\theta$ における最も優れたTの値を得る。 $\theta$ を1度ずつ変化させることで最適な $\theta$ とTの値の組み合わせを明らかにする。

#### (2) GLの日射制御

斜角型HCと同様に、日射遮蔽物を置かない場合とGLを置いた場合の6月と12月の1か月間の積算日射量の解析結果から日射遮蔽率を算出する。なお、このとき孔の軸方向に対して垂直な面で孔を切断した際の切り口は常に正方形である。また、グリッドの板の間隔(断面正方形の1辺の長さ)は斜角型HCの向かい合う2面の距離( $11\sqrt{3}$ mm)と同じ長さとして定めている。

### 2-2. パネル取り付け角度に関して

#### (1) パネル取り付け角度に応じた最適な $\theta$ 、Tの予想

太陽軌道から図学的に遮光率を計算するシステムをGrasshopper内に構築し、パネル取り付け角度(以下 $\theta'$ )を変化させたときの最適な $\theta$ とTを冬至と夏至の南中高度から予想する。ハニカムは同じ方向を向いた孔の集合体であるため、平行光に対して遮光率が0%となる角度がある。つまり、ハニカムの孔の方向を冬季の日射を多く取得できる方向に向けることで、冬季の日射を極力多く取得できると予想される。また、パネルの厚さを大きくするほど、日射を多く遮ることが予想される。そこで、冬至の南中時に遮光率が0%となるように $\theta$ と $\theta'$ を定め、夏至の南中時に遮光率が100%となるようにTを定める。つまり $\theta$ と $\theta'$ の間には、その土地の冬至の南中高度を用いて、

$$\theta = \theta' + \text{冬至の南中高度}$$

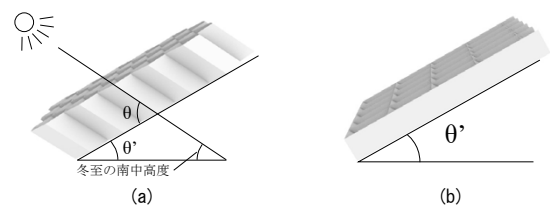


図2-3.  $\theta'$ : パネル角度 (a)  $\theta$ と $\theta'$ の関係 (b) GLの $\theta'$

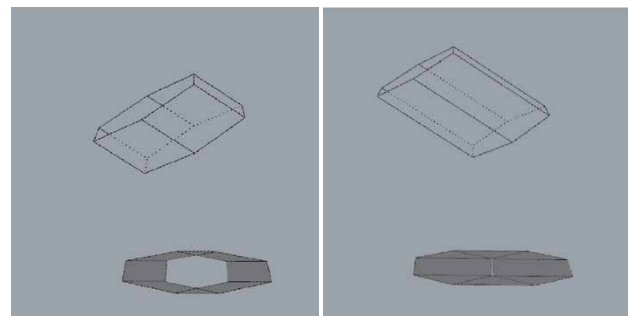


図2-4. 夏至の遮光率 (a) 49% (b) 99%

の関係式が成立する。次に、 $T$ を $0.1\text{mm}$ ずつ増やしていき、夏至の南中高度からの水平面への平行投影が、内部に光をもたらさなくなる時の $T$ を求める。これによって、各パネル取り付け角度 $\theta'$ における最適な $\theta$ と $T$ の組み合わせを予想できると考える。

なお、福岡市の冬至の南中高度は $33$ 度、夏至の南中高度は $80$ 度とする。また、天候データはClimate.OneBuilding.Org<sup>[11]</sup>からダウンロードしたものを用いる。

## (2) パネル角度と $\theta$ 、 $T$ の関係

2-2.(1)で日射制御を最適化する形状を太陽軌道から図学的に予想する方法について示した。次に、実際に解析を行い、その仮説が妥当であるか判断する。 $\theta'$ を $0$ 度から $15$ 度刻みで $60$ 度まで切り替え、その $\theta'$ ごとに $\theta$ と $T$ の最適な組み合わせを見つける。その結果から、 $\theta'$ を変化させたときの日射制御能力の変化を斜角型HCとGLのそれぞれについて明らかにする。

## 2-3. 輝度分布解析

ここまでの積算日射量の解析および遮光率の算出は、遮光物の孔の内部表面での反射を考慮せずに行うものである。しかし、実際は孔内部の表面での反射がパネルの反対側の見え方に影響を与えることから、輝度解析においては孔内部の表面での反射を考慮して解析を行う。斜角型HCはアルミニウムで製作することが想定されるため、鏡面仕上げのアルミニウムの可視光線反射率が $70 \sim 80\%$ 程度であることを踏まえ、反射率を $75\%$ として設定し解析を行う。

## 3. 結果

### 3-1. 積算日射量の解析

$\theta'=0$ の時の斜角型HCとGLの日射遮蔽率の6月と12月の差をグラフにまとめたものを(図3-1)に示す。斜角型HCとGLともに、 $\theta=30$ 度で最大となり、そのときの $T$ は斜角型HCは $19\text{mm}$ であるが、GLは $25\text{mm}$ であった。また、 $\theta$ 、 $T$ が最適値のときの6月と12月の日射遮蔽率差は斜角型HC、GLそれぞれ $12.49\%$ と $12.91\%$ であり大きな差は見られなかった。

### 3-2. パネル取り付け角度に関して

2-2.(1)で述べた、図学的に求めたパネル取り付け角度( $\theta'$ )を変化させたときの $\theta$ と $T$ の最適な組み合わせの予想を(表3-1)に示す。

次に、解析で求めた最適な $\theta$ と $T$ の組み合わせを(表3-2)に示す。パネル取り付け角度は $\theta'=15$ 度、 $30$ 度、 $45$ 度、 $60$ 度の4つのケースについて $\theta'=0$ のときと同様に解析した。

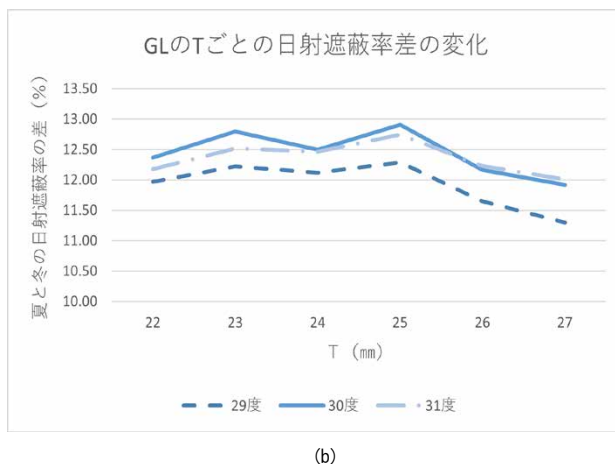
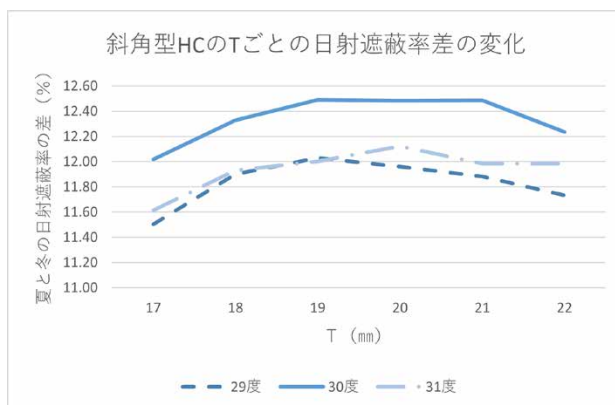


図3-1.  $T$ ごとの日射遮蔽率差 (a) 斜角型HC (b) GL

$\theta'(^{\circ})$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$\theta(^{\circ})$	33	38	43	48	53	58	63	68	73	78	83	88	93
$T(\text{mm})$	25.7	26	26.1	26	25.7	25.2	24.5	23.7	22.6	21.4	20	18.5	16.8

表3-1. 福岡市におけるパネル角度ごとの予想 $\theta$ 、 $T$

$\theta'(^{\circ})$	0	15	30	45	60	$\theta'(^{\circ})$	0	15	30	45	60
$\theta(^{\circ})$	30	45	58,60	75	89	$\theta(^{\circ})$	30	45	60	75	89
$T(\text{mm})$	19	19	17,18	16	13	$T(\text{mm})$	25	23	20	15	15

(a) HC (b) GL  
表3-2. 福岡市におけるパネル角度ごとの最適 $\theta$ 、 $T$

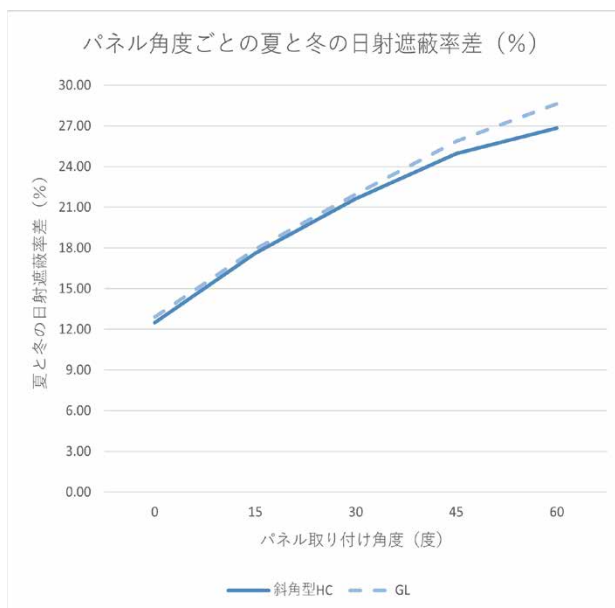


図3-2.  $\theta'$ ごとの夏冬日射遮蔽率差

解析の結果、最適な $\theta$ とTは必ずしも(表3-1)と一致せず、3度程度の差が生じた。福岡市における最適な孔の向きは冬至の南中高度よりも3度低い30度の方向であると分かった。

パネル取り付け角度を0度～60度まで変化させたときの斜角型HCとGLの積算日射の遮蔽率の差をグラフにまとめたものを(図3-2)に示す。斜角型HC、GLともに $\theta'$ が増えると夏と冬の遮蔽率の差は拡大することが分かる。 $\theta'=0$ のときに12%程度だった日射遮蔽率差は $\theta'=60$ の時には27%程度まで向上することが読み取れる。また、 $\theta'$ が大きくなっても、6月と12月の日射遮蔽率差に関して、斜角型HCとGL間に大きな差は見られなかった。

### 3-3. 輝度分布解析

(図3-3,4,5)に輝度解析の結果を示す。ただし $\theta=0$ 度の時の結果のみを示す。立方体の上面は $\theta$ とTが等しい斜角型HC、GL、PLであり、視点は部屋の中央の高さで水平北向きに置かれている。図の正面が北側の壁であり、左右はそれぞれ西側、東側の壁である。

グレア評価にはDGPを用いた。DGPとは、0.45を上回ると人間が耐え難く感じるとされるグレアの指標である。 $\theta$ 、Tが等しい斜角型HC、GL、PLでは、斜角型HCが最も優れたDGPの値を示した。また、14時のGLと14,16時のPLでは縞状の直射光が差しているが、14,16時の斜角型HCと16時のGLでは直射光はほとんどが反射・拡散され、均質な光環境となっている。

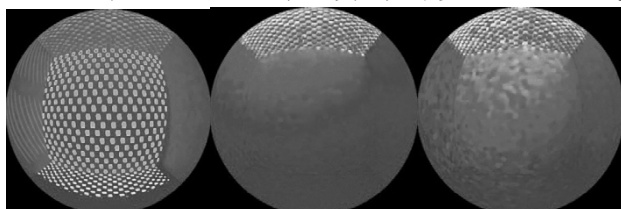


図3-3. 斜角型HCのグレア分布とDGP (a) 12時 (b) 14時 (c) 16時

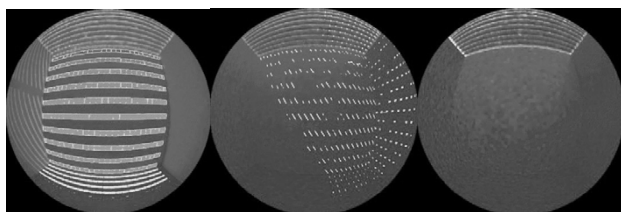


図3-4. GLのグレア分布とDGP (a) 12時 (b) 14時 (c) 16時

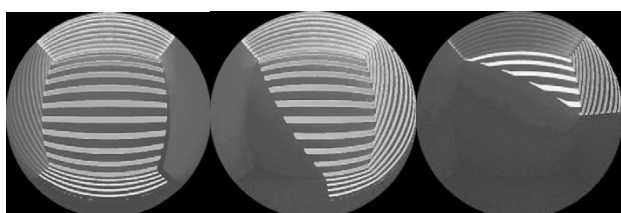


図3-5. PLのグレア分布とDGP (a) 12時 (b) 14時 (c) 16時

## 4. 考察とまとめ

積算日射量の解析の結果、斜角型HCとGLはほぼ同等の性能を示したが、パネルの厚さは斜角型HCの方が24%薄かった。また、斜角型HCの夏と冬の日射遮蔽率はそれぞれ93%、81%であった。3-2.の結果からパネル取り付け角度を変化させるとこの性能はさらに高い性能を示すことが明らかになった。特に60度の取り付け角度において77%、50%の遮蔽率を示し、夏と冬の遮蔽率の差は27%に達し、0度の時の2倍以上の性能を示した。

輝度分布解析結果から、斜角型HCはGL、PLに比べてグレアが少なく、光の均質性の面でも優れた性能を示した。これは、HCの六角柱内部で複雑に光が反射を繰り返し散乱させる効果があるためと考えられる。

本研究成果によって、斜角型HCの光環境制御装置としての基本的な特性を明らかにした。ハニカム構造の持つ優れた機械的特性や構造材としての特性と組み合わせることで、魅力的な建材ができると期待される。

本研究ではモデル化とシミュレーションによる比較までしかできなかったが、今後実験を行うことで、シミュレーションでは明らかにできなかった反射光を考慮した日射量測定や輝度分布測定、パネル下での温熱環境の測定を行うこともできると考えられる。さらに、材料を変えた解析や実験を行うことで、斜角型HCの特性をより引き出す素材を発見し、優れた環境制御装置の開発に発展していくと思われる。

### 【参考文献】

- [1] 齊藤一哉, 野島武敏: 「任意断面を持つハニカムコアの展開図設計法」日本機械学会論文集A編, 78, 324-335 (2012)
- [2] 齊藤一哉, 岩元真明, 中元翔一, 田米開三恵子: 「折紙の幾何学に基づく斜角型ハニカムコアの開発とその視覚効果の検証」応用数理学論文集 31(3) 160-171 (2021)
- [3] 酒井敏: 「フラクタル日除けについて」[http://www.gaia.h.kyoto-u.ac.jp/~fractal/detail/index.html/\(2022.11.23アクセス\)](http://www.gaia.h.kyoto-u.ac.jp/~fractal/detail/index.html/(2022.11.23アクセス))
- [4] 酒井敏: 「フラクタル日除けによるパッシブな都市型クールアイランド創生実験」(2017)
- [5] 酒井敏, 菅原広史, 三坂育正, 成田健一, 清田誠良, 本條毅: 「フラクタル日除けによるクールアイランドの創出 その① 実験概要と気温特性」日本建築学会(2016)
- [6] 菅原広史, 酒井敏, 三坂育正, 成田健一, 清田誠良, 本條毅: 「フラクタル日除けによるクールアイランドの創出 その② 日除けの熱収支と放熱特性」日本建築学会(2016)
- [7] 酒井敏, 中村美紀: 「フラクタル日除けの基本原則 都市表面の形状と表面温度について」(2012)
- [8] 酒井敏: 「Sierpinski's forest: New technology of cool roof with fractal shapes」(2012)
- [9] 酒井敏, 中村美紀: 「フラクタル日除けによる放射環境改善効果」日本ヒートアイランド学会論文集 Vol.6 (2011)
- [10] 春田昌也: 「フラクタル図形を用いた平行光の拡散に関する研究」大阪市立大学大学院 都市系専攻 修士論文概要集(2014)
- [11] 「Climate.OneBuilding.Org」[https://climate.onebuilding.org/\(2022.12.07アクセス\)](https://climate.onebuilding.org/(2022.12.07アクセス))