

ひずみ速度依存性と異方性を活用した 高機能プロテクターの開発

金沢大学 理工研究域 フロンティア工学系
樋口 理宏



本研究は2021年度『競輪とオートレース補助事業』の助成（2021-M132）を受けて実施しました

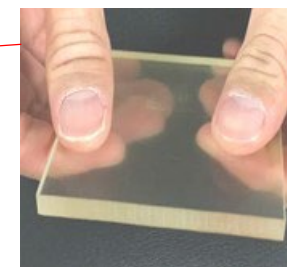
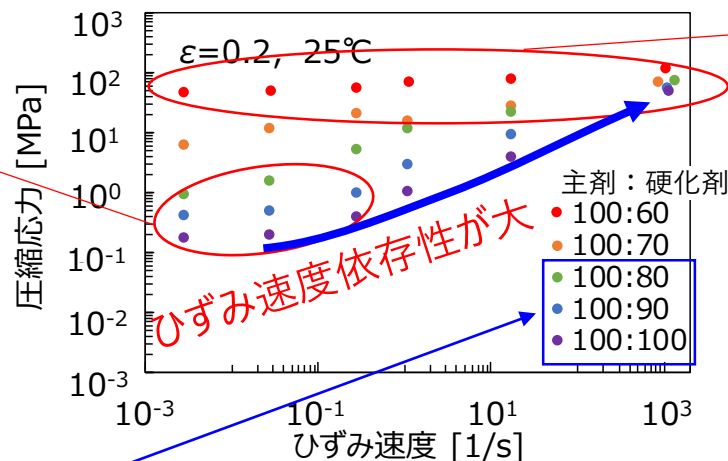
本研究では、ひずみ速度依存性が極めて高い軟質エポキシ樹脂を母材とした異方性を有するハニカム構造を提案し、低速変形時は、面内方向および面外方向に対して極めて柔軟であるが、衝撃負荷時のみ面外方向に硬化することで、効果的に人体を保護する高機能プロテクターを開発する。

■ 低速変形で柔軟、高速変形でのみ硬化するエポキシ樹脂



ゴム状態

手で曲げられるくらい柔軟



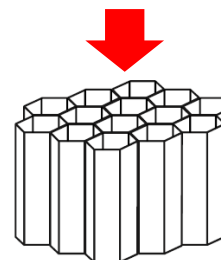
ガラス状態

硬質

主剤と硬化剤の配合比の調整により極めて高いひずみ速度依存性を発現可能

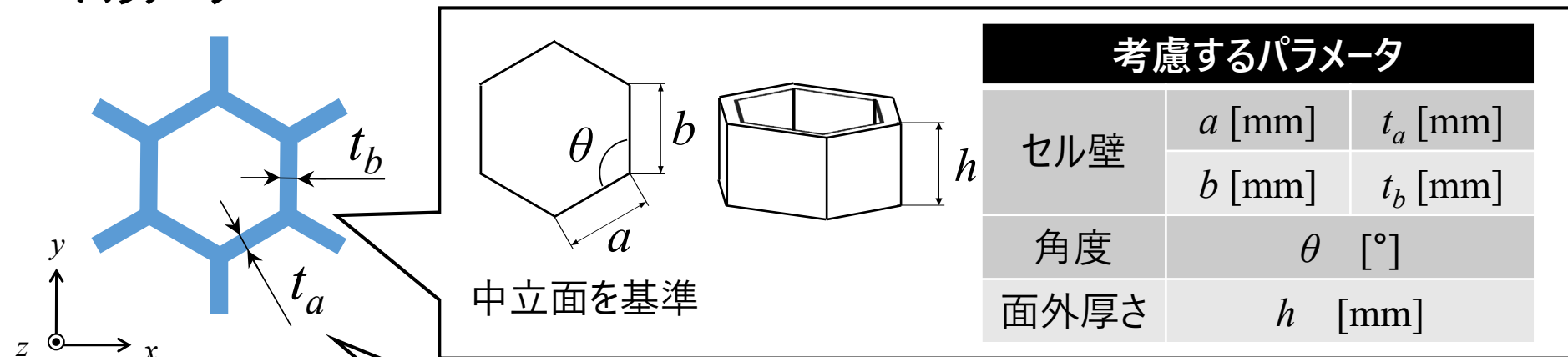
■ ハニカム構造 = 異方性を有する構造

素材が柔軟であれば
面内方向の伸縮性が良好

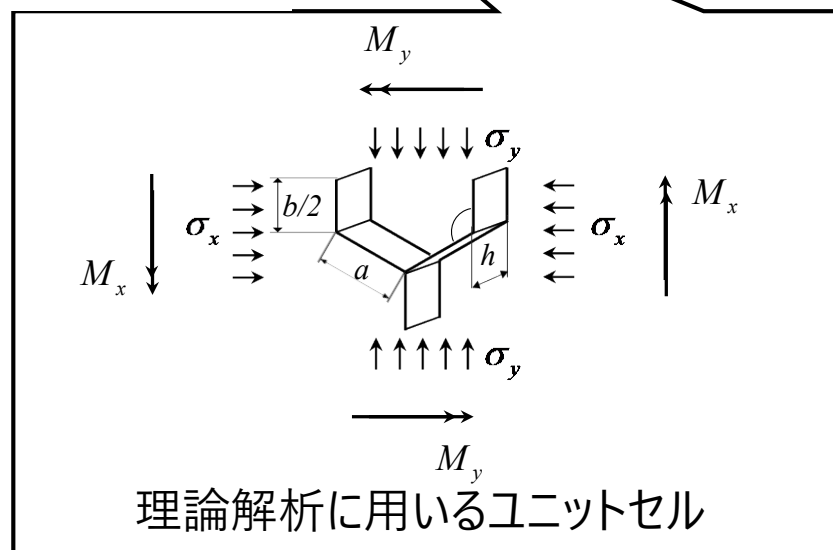


素材が高弾性であれば
面外（厚さ）方向に高強度
でエネルギー吸収性が良好

■ パラメータ



■ ユニットセル



● 面内剛性

はりの曲げ理論から導出 (既知)

● 面外曲げ・ねじり

異方性平板理論に基づく定式化が必要



セル形状を決定

■ 面内方向

$$E_x^* = \frac{1}{\sin^3 \theta} \times \left(\frac{b}{a} - \cos \theta \right) \times \left(\frac{t_a}{a} \right)^3 \times E_s$$
$$E_y^* = \frac{\tan \theta}{\left(\frac{b}{a} - \cos \theta \right) \cos \theta} \times \left(\frac{t_a}{a} \right)^3 \times E_s$$
$$\nu_{yx} = - \frac{\sin \theta \tan \theta}{\left(\frac{b}{a} - \cos \theta \right)}$$

etc...

■ 面外方向

$$E_z^* = E_s \times \frac{t_a}{a} \times \frac{3(b/a + t_a/t_b)}{4 \frac{t_a}{t_b} \sin \theta \left(\frac{b}{a} - \cos \theta \right)}$$

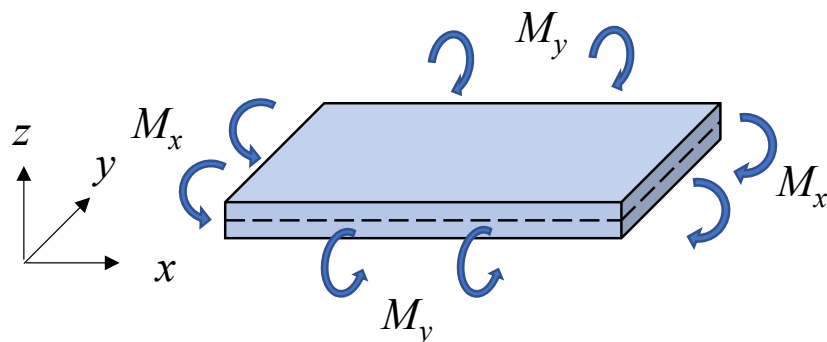
$b/a = \alpha, \quad t_a/a = \gamma, \quad t_a/t_b = \delta$



等価剛性	$E_x^* = E_s \times \gamma^3 \times \frac{\alpha - \cos \theta}{\sin^3 \theta}$	$E_y^* = E_s \times \gamma^3 \times \frac{\tan \theta}{(\alpha - \cos \theta) \cos \theta}$
	$E_z^* = E_s \times \gamma \times \frac{3(\alpha + \delta)}{4\delta \sin \theta (\alpha - \cos \theta)}$	
せん断剛性	$G^* = E_s \times \gamma^3 \times \frac{\alpha - \cos \theta}{\alpha^2 (2\alpha + 1) \sin \theta}$	
ポアソン比	$\nu_{yx} = - \frac{\sin \theta \tan \theta}{(\alpha - \cos \theta)}, \quad \nu_{xy} = \frac{1}{\nu_y}$	

曲げ剛性 #1

■ Kirchhoffの薄肉異方性平板理論



中立面に生じるひずみから得られる関係式

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E_x}(\sigma_x - \nu_{xy}\sigma_y) \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E_y}(\sigma_y - \nu_{yx}\sigma_x) \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{G_{xy}}\tau_{xy}$$

$$\varepsilon_x = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad \varepsilon_y = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad \gamma_{xy} = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

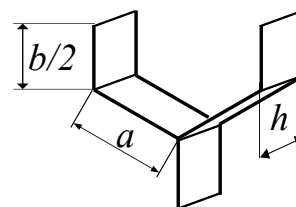


$$M_x = -\left(D_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + D_1 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) \quad M_y = -\left(D_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + D_1 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)$$

$$M_{xy} = 2D_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

■ Chen Dai-hengの理論

➤ ハニカムの曲げ・ねじり剛性の理論解析



各セル壁に生じる変形



ユニットセル全体の変形

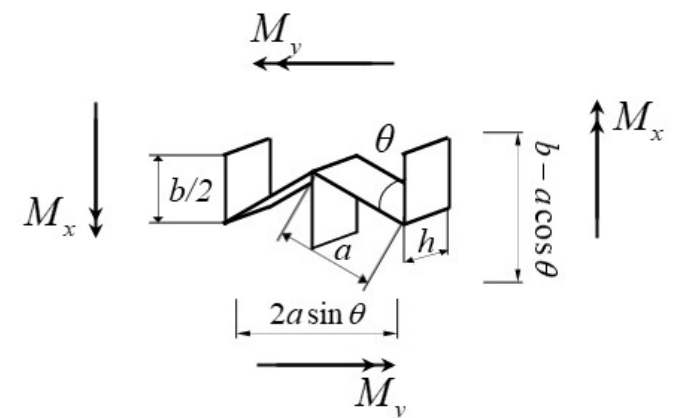
曲げ剛性 D_x, D_y, D_1, D_{xy} を導出

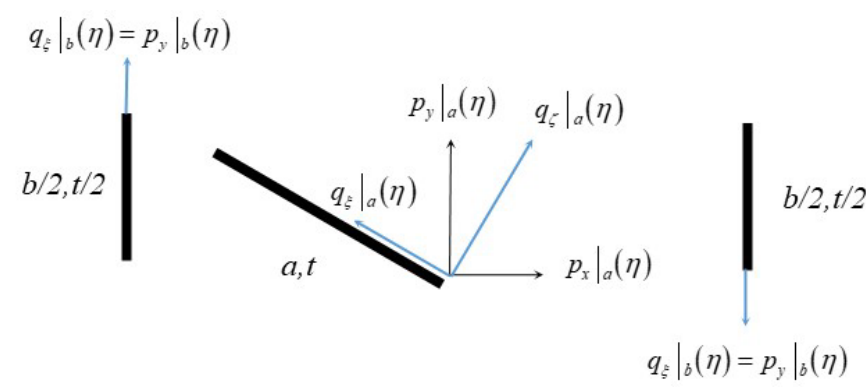
ハニカムの理論式



反転ハニカムへの式の拡張

■ 導出





M_x, M_y を負荷した場合のセル壁1辺に生じる回転角を導出

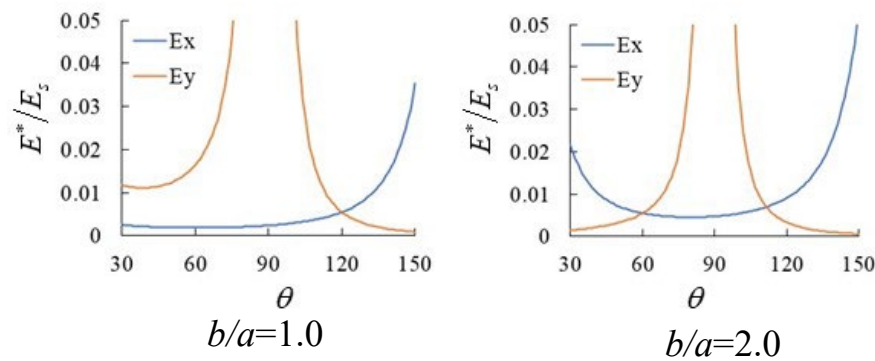
$$C_x = \frac{1}{\rho_x} \Big|_{M_x} = \frac{(\theta_{l\sigma}|_y + \theta_{lr}|_y) \times 2}{2a \sin \theta}$$
$$C_y = \frac{1}{\rho_y} \Big|_{M_y} = \frac{(\theta_{a\sigma}|_x + \theta_{ar}|_x) + 2\theta_{bx}}{b - a \sin \theta}$$
$$C_1 = \frac{1}{\rho_x} \Big|_{M_y} = \frac{(\theta_{a\sigma}|_y - \theta_{ar}|_y)}{a \cos \theta}$$

$$D_x = \frac{C_y}{C_x C_y - C_1^2}$$
$$D_y = \frac{C_x}{C_x C_y - C_1^2}$$
$$D_1 = \frac{-C_1}{C_x C_y - C_1^2}$$

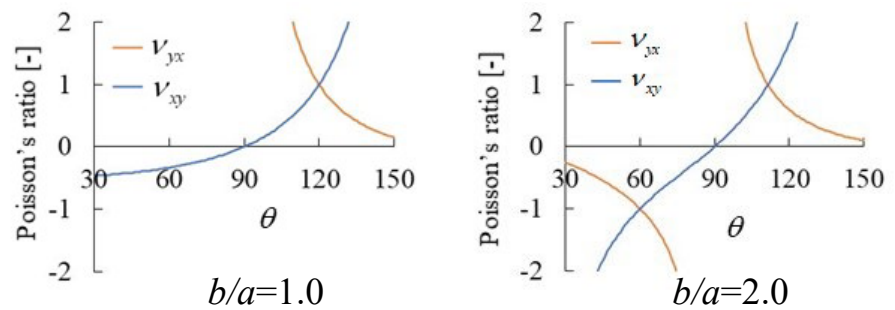
ユニットセル全体の曲げコンプライアンスから
曲げ剛性を導出

$\alpha = \frac{b}{a}, \beta = \frac{h}{a}, \gamma = \frac{t_a}{a}, \delta = \frac{t_a}{t_b}$ q_t は解析により得られる係数
$D_x = E_s I_s \times \gamma \times \left(\frac{\sin \theta}{\alpha - \cos \theta} \right) \times \left[\frac{(2\alpha\delta + \cos^2 \theta) + \sin^2 \theta (q_{ar} \times \beta \gamma^{-2})}{2\alpha\delta \sin^2 \theta + (1 + 2\alpha\delta \cos^2 \theta) (q_{ar} \times \beta \gamma^{-2})} \right]$
$D_y = E_s I_s \times \gamma \times \left(\frac{\alpha - \cos \theta}{\sin \theta} \right) \times \left[\frac{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta (q_{ar} \times \beta \gamma^{-2})}{2\alpha\delta \sin^2 \theta + (1 + 2\alpha\delta \cos^2 \theta) (q_{ar} \times \beta \gamma^{-2})} \right]$
$D_1 = E_s I_s \times \gamma \times (\sin \theta \cos \theta) \times \left[\frac{1 - (q_{ar} \times \beta \gamma^{-2})}{2\alpha\delta \sin^2 \theta + (1 + 2\alpha\delta \cos^2 \theta) (q_{ar} \times \beta \gamma^{-2})} \right]$
$D_{xy} = E_s I_h \times \gamma^3 \times \frac{\sin \theta (\alpha - \cos \theta)}{\gamma^2 (1 - \alpha \cos \theta)^2 + [2q_{br} \delta^3 + q_{ar}] \alpha^2 \beta \sin^2 \theta}$

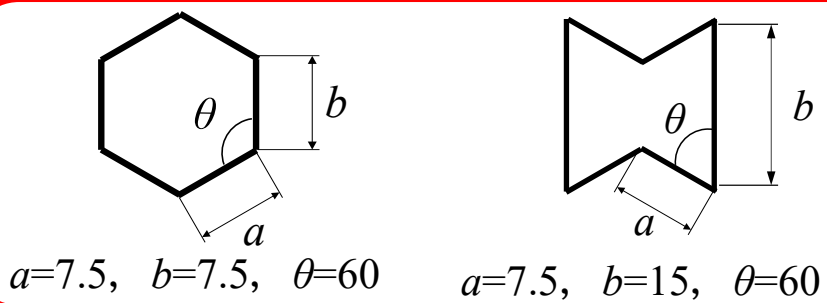
■ 面内剛性



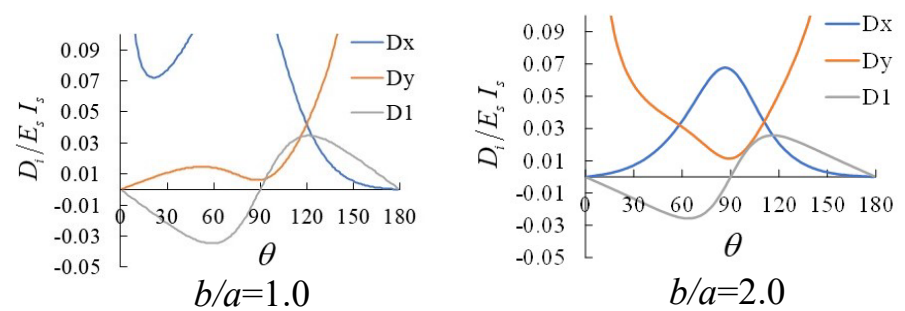
■ ポアソン比



■ セル形状



■ 曲げ剛性



$\theta < 90^\circ$ において $D_1 < 0$

$$M_x = -\left(D_x \frac{1}{\rho_x} + D_1 \frac{1}{\rho_y}\right) \quad M_y = -\left(D_y \frac{1}{\rho_y} + D_1 \frac{1}{\rho_x}\right)$$

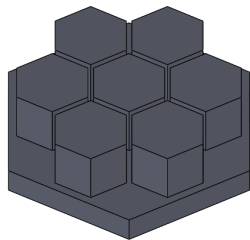
より, M_x を加え, $M_y=0$ とした場合,

$$\frac{1}{\rho_y} = -\frac{D_1}{D_x} \frac{1}{\rho_x}$$

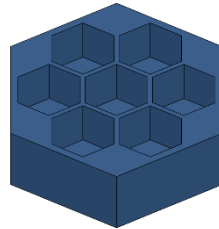
曲率が同符号となり, ドーム状に変形

- 反転ハニカム
面内, 曲げに等方性 $b/a=2.0, \theta=60^\circ$
- ハニカム
反転ハニカムと等しいセル面積を持つ寸法

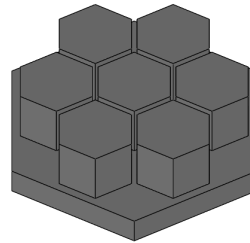
■ 成形の流れ



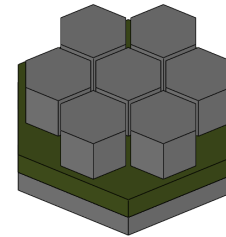
3Dプリンターで
型原型を作製



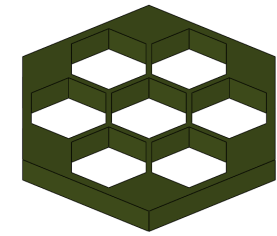
シリコンに転写



ワックス型の成形



樹脂注型・硬化



型の融解・除去



助成により導入した3Dプリンター
3DSYSTEMS, ProJet MJP 2500 Plus



任意に操作可能

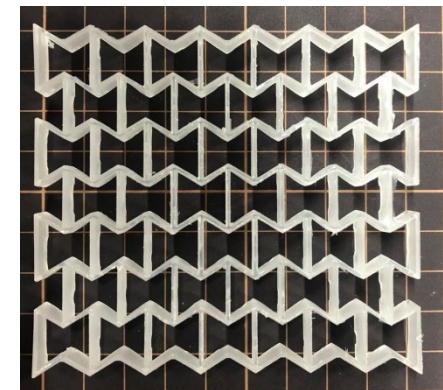
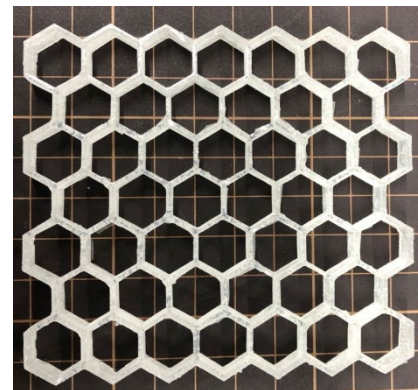


樹脂硬化後に
型を融解

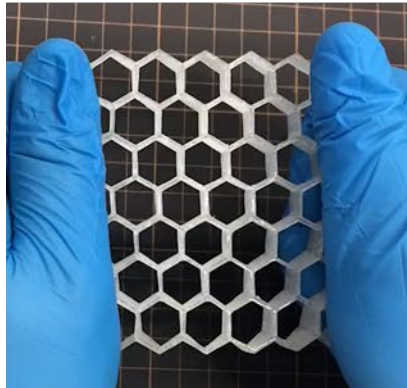
熱硬化性・高接着性のエポキシ樹脂に有効

■ 成形したエポキシハニカム

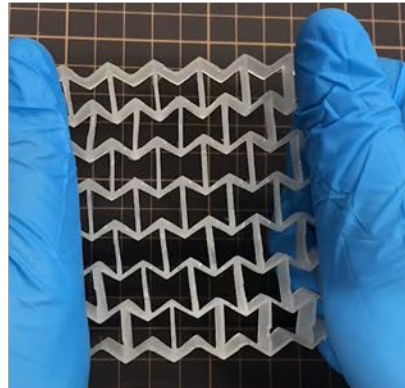
セル数：46
縦×横：92×83.7 [mm²]
壁厚：1 [mm]



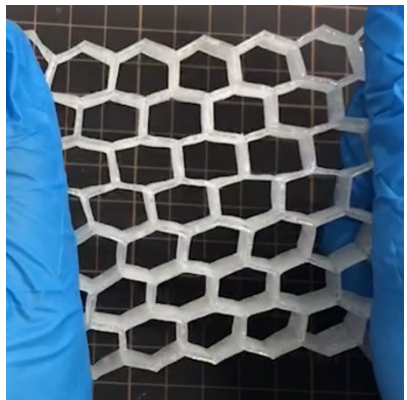
■ 引張・圧縮



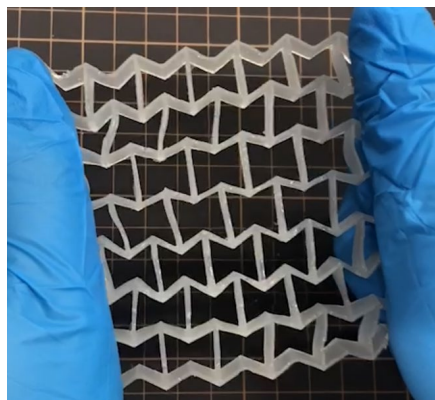
$$\nu = 1$$



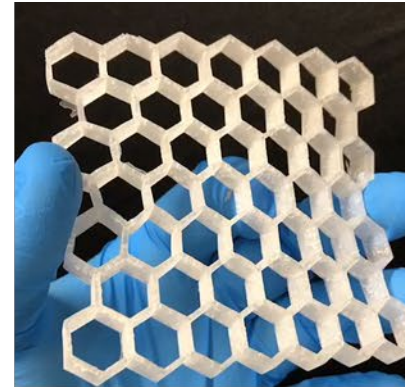
$$\nu = -1$$



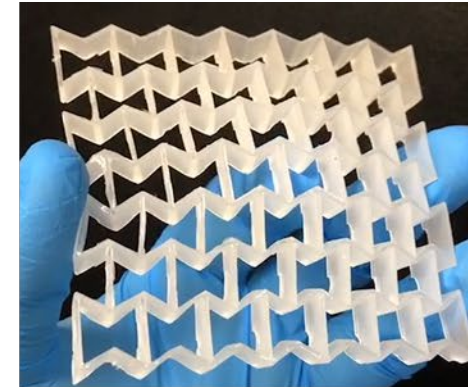
面内方向の柔軟性



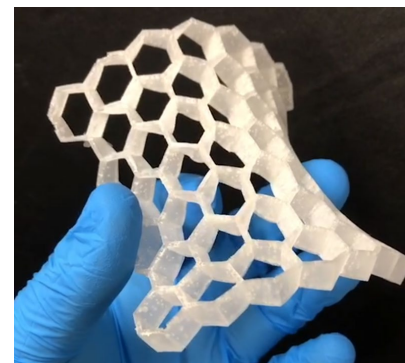
■ 曲げ



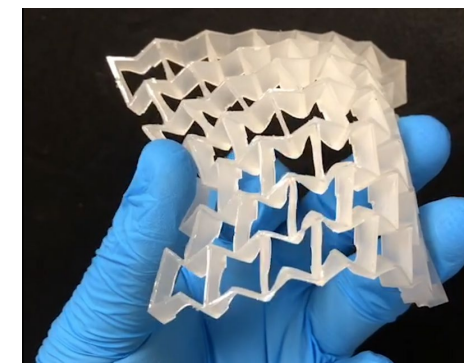
$$D_1 > 0$$



$$D_1 < 0$$

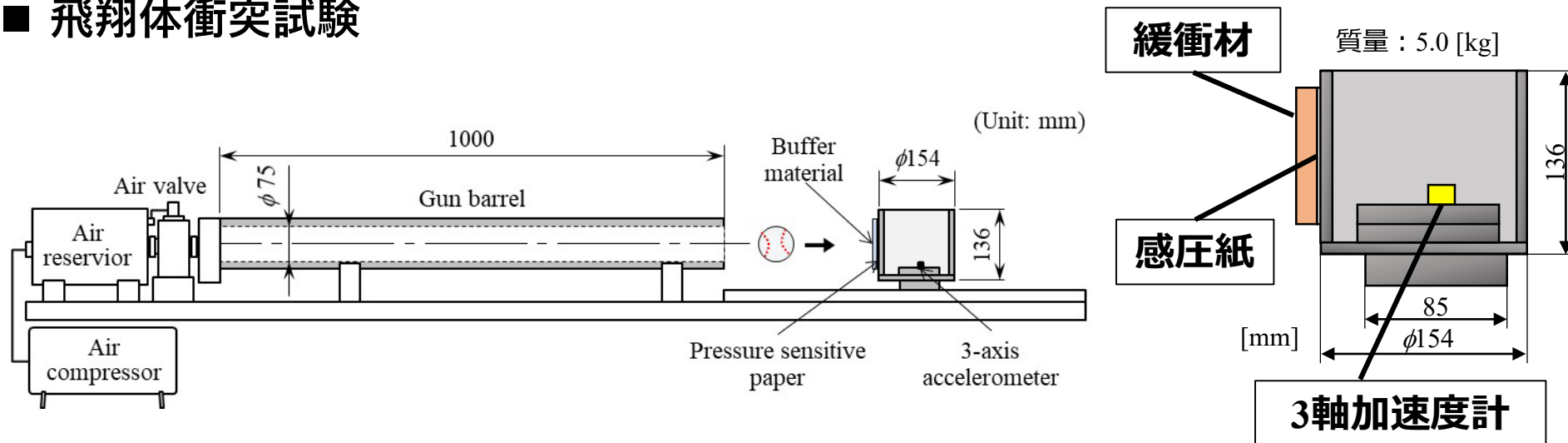


鞍状に変形



ドーム状に変形

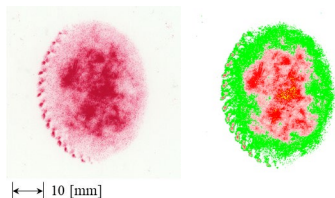
■ 飛翔体衝突試験



■ 評価指標

感圧紙

圧力分布の評価



反発係数

飛翔体の 衝突速度 V_0
衝突後速度 V_1

$$\text{反発係数 } e = V_0 / V_1$$

加速度波形・HIC

- 頭部傷害基準(HIC : Head Injury Criterion)

$$\text{HIC} = \left[\left\{ \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right\}^{2.5} (t_2 - t_1) \right]_{\max}$$

$a(t)$: 頭部重心の合成加速度
 t_1, t_2 : 積分を行う開始及び終了時間(HICが最大となるように選択)
 頭部重症リスクと相関のある評価値

飛翔体：硬式球

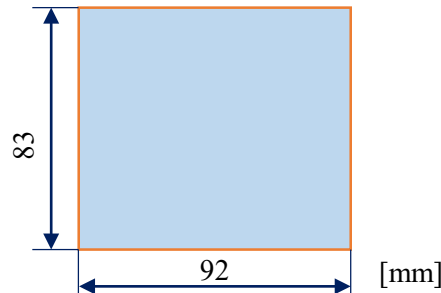
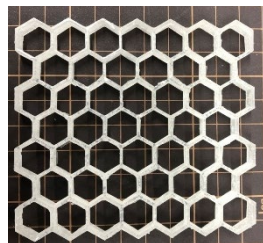
直径：73.2 [mm], 質量：147.9 [g]
 射出速度：約70 [km/h]

緩衝材(試験片)

- 緩衝材なし(Without)
- 反転ハニカム(Re-entrant)



- ハニカム(Honeycomb)



厚さ t : 7.5 [mm]

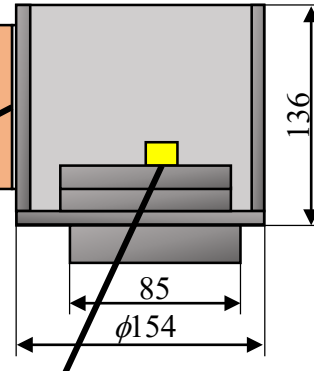
空隙率：0.86
 見かけ密度：0.15
 [g/cm³]

緩衝材

質量：5.0 [kg]

感圧紙

[mm]

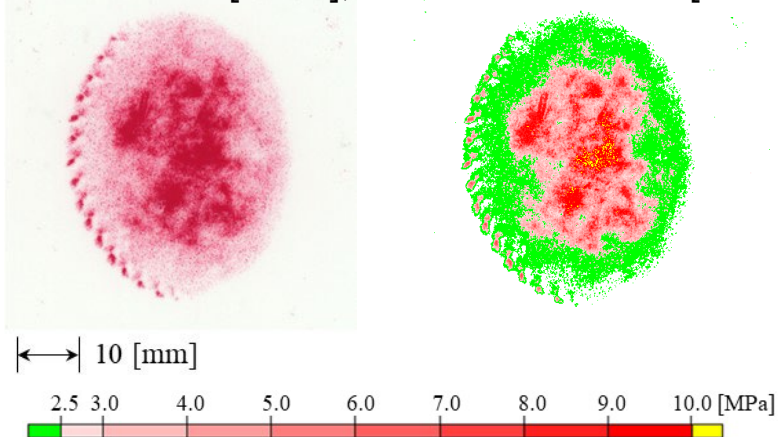


3軸加速度計



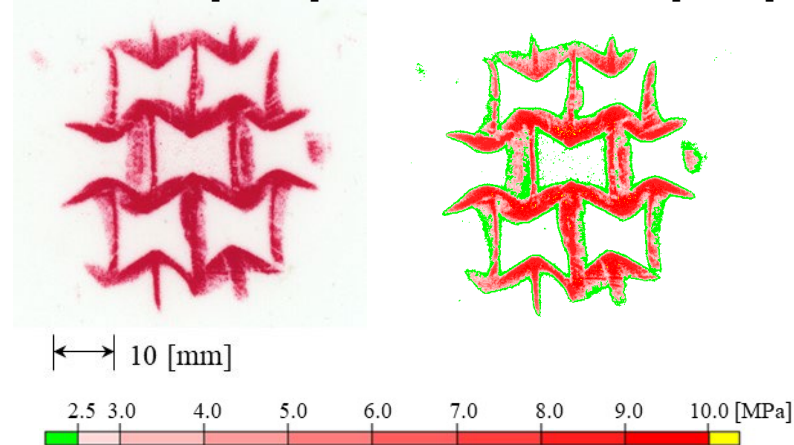
■ Without

加圧面積：1163 [mm³], 平均圧力：3.25 [MPa]



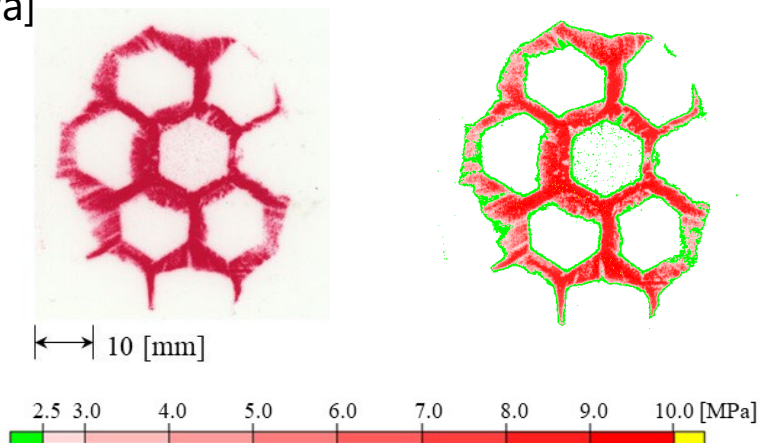
■ Re-entrant

加圧面積：864 [mm³], 平均圧力：4.90 [MPa]



■ Honeycomb

加圧面積：763 [mm³], 平均圧力：5.10 [MPa]



■ 結果

- ✓ 加圧面積の減少による平均圧力の増加
- ✓ 全体に概ね均等な圧力分布



セルサイズおよび壁厚の調整による
圧力分布の変更が可能

試験結果：反発係数

■ 頭部が受ける力積

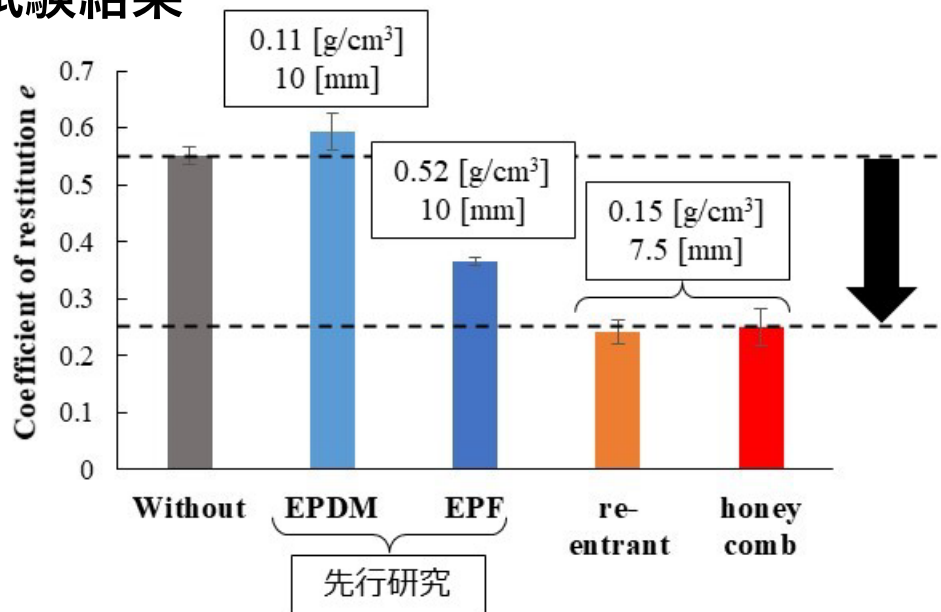
頭部モデルの衝突によって生じる速度 ≈ 0 とした場合
 M : 飛翔体質量 V : 衝突前後の速度 e : 反発係数

$$F\Delta t = M(V_0 + V_1) = MV_0(1 + e)$$

反発係数の減少

頭部が受ける力積の減少

■ 試験結果



■ 過去の実験結果との比較

● EPDMフォーム



ニーサポーターなどに利用

0.11 [g/cm³]
厚さ：10 [mm]

● エポキシフォーム(EPF)

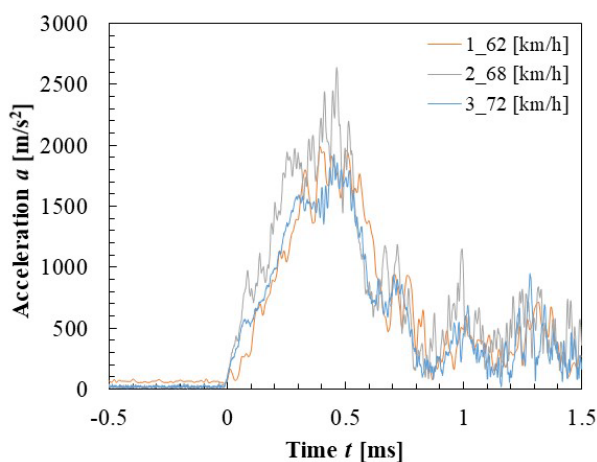


エポキシ樹脂の発泡体

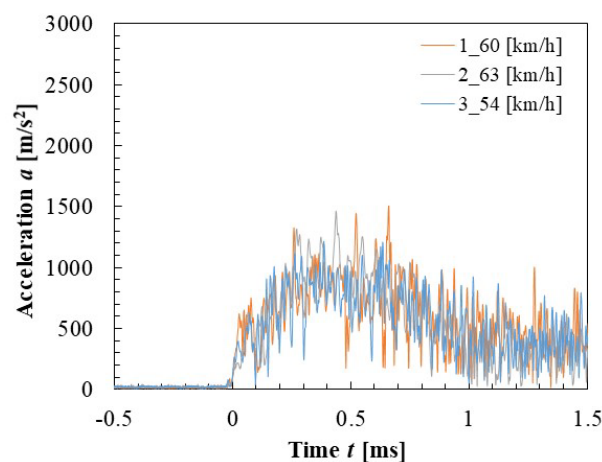
0.52 [g/cm³]
厚さ：10 [mm]

面外方向の衝撃吸収性および
ひずみ速度依存性に起因する
低反発性を確認

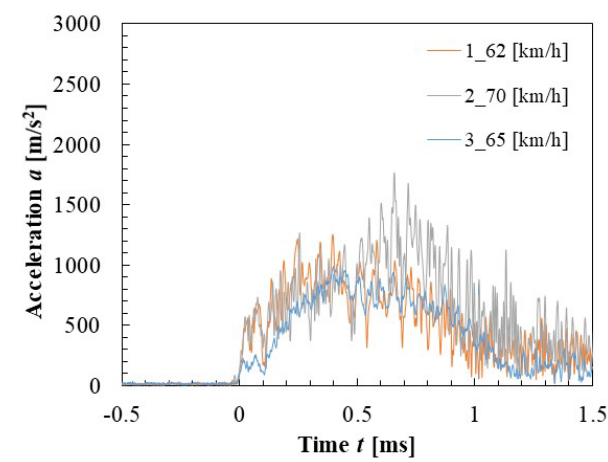
■ 加速度波形



Without



Re-entrant



Honeycomb

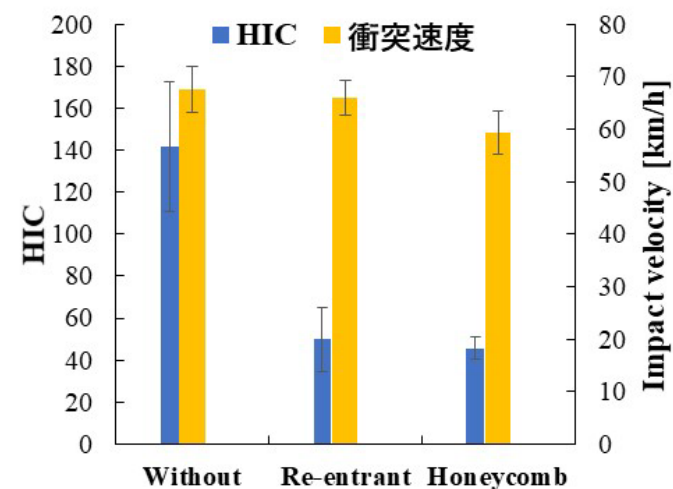
■ HIC

頭部傷害リスクと相関のある評価値

$$\text{HIC} = \left[\left\{ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right\}^{2.5} (t_2 - t_1) \right]_{\max}$$

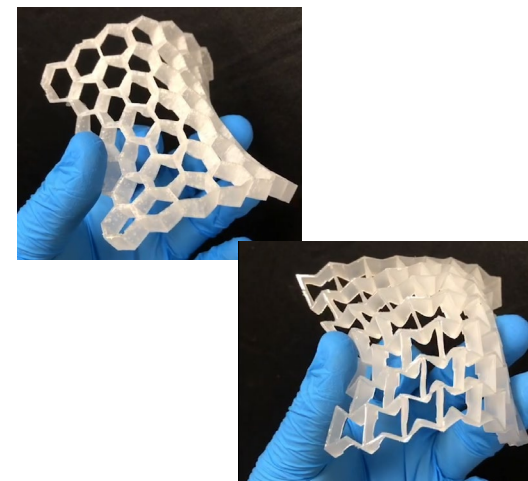
平均加速度 持続時間

$\frac{\text{力積}}{\text{頭部質量}}$ が補正された評価値



HICを大幅に低減

ひずみ速度依存性が極めて高い軟質エポキシ樹脂を母材とした異方性を有するハニカム構造を提案し，低速変形時は，面内方向および面外方向に対して極めて柔軟であるが，衝撃負荷時のみ面外方向に硬化する高機能プロテクターの開発に成功した。



謝 辞

本研究は2021年度『競輪とオートレース補助事業』の助成（2021-M132）を受けて実施しました

JKA Social Action
競輪とオートレースの補助事業

00 **KEIRIN.JP**
KEIRIN Official Website