

# 乗用車の正面衝突における人体損傷に与える影響の考察

(代表) 林 祐太 (理工学域機械工学類 3年)  
石原祥吾 (理工学域機械工学類 3年)  
羽倉隆平 (理工学域機械工学類 3年)  
堀川一樹 (理工学域機械工学類 3年)  
西 悠介 (理工学域電子情報学類 3年)

指導教員

宮崎 祐介 (理工研究域 機械工学系 助教)

## 1 背景と研究目的

近年、交通事故件数は減少に転じたものの、未だ高い発生件数を維持している。一方で、死者数は8年連続で減少を続けている。死傷者が減少した原因として、車体前後の「クラッシュブルゾーン」と衝突の衝撃を受けても変形しない「セーフティゾーン」を持つ衝突安全ボディの採用やエアバッグ、ABSなどの安全技術の発達が挙げられる。しかしながら、死に至らなくても、日常生活に支障を来す傷害は可能な限り低減する必要がある。そこで今回注目したのが繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastics, FRP) を用いた衝撃吸収装置である。衝突時の人体損傷は「クラッシュブルゾーン」が破壊するとき生じる減速加速度が大きく影響していることが分かっている。一般の金属材料では座屈によるエネルギー吸収が起こるので、単位重量あたりの吸収エネルギーを大きくすることには限界があり、理想的な減速加速度を実現することが難しい。一方、FRPは座屈とは異なる、プログレッシブクラッシュという変形挙動を示し、破壊が破滅的な破砕をせずに進行していくため、理想的な減速加速度を実現しうる可能性がある。

そこで、今研究では人体損傷を低減するための衝撃吸収構造体 (Impact Attenuator, IA) を設計するため、1) 製作可能な形状の中でどれがより理想的な減速加速度を実現しているのか人体挙動解析ソフトMADYMOを用いて解析・検証を行い、2) FRP 静的圧壊時の破壊特性の傾向を調査する。

また今研究では自動車構造を直接論じるのは困難であると判断したため、基礎的な研究として位置づけ、解析における車輻モデルとして金沢大学フォーミュラ研究会が製作したKF2008(図1)を用いる事とする。



図1 KF2008

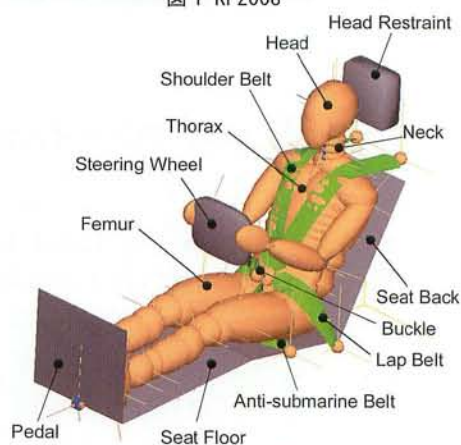


図2 解析に用いたモデル

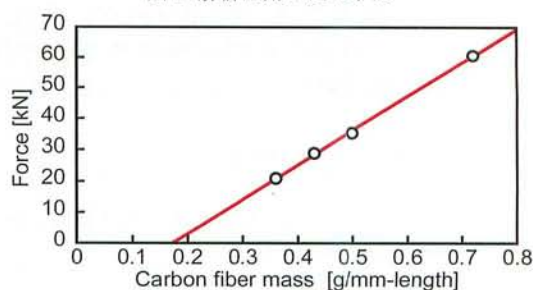


図3 CFRPの質量比荷重

## 2 解析概要

### 2.1 IA 形状

IA 形状の条件は、製作可能であり、より多くの試験片で実験をするため、製作性に優れているものでなければならない。以上を踏まえ、

- 一定の肉厚を持った薄肉円筒（以下、Constant-G）
- IA の肉厚が先端から取り付け点に向かい単調に増加する薄肉円筒（以下、Late high-G）

の二つが候補として挙げられる。この二つの減速加速度曲線は図4となり、どちらがより人体損傷を低減できるか、MADYMO を用いて解析し、検証する。

また過去の実験結果より、荷重と IA 肉厚は比例している（図3）ため、荷重は IA の肉厚と積層構成により容易に変更できることがわかる。IA の体積を一定とし、Constant-G と Late high-G の両方の場合で、IA 長を 200mm から 300mm まで 10mm ずつ伸ばした、22 種類の荷重曲線図を用いて解析し、比較を行う。

### 2.2 解析条件

人体モデルには Hybrid III ダミーの American Male 50%ile (AM50) マルチボディモデルを用いた。ドライバーの位置、シートベルトは 2008 年に金沢大学フォーミュラ研究会が製作した KF2008 を元に設定した。シート、ステアリングホイール、ペダルは剛体とし、手はステアリングホイールに固定した。また衝突速度を 25km/h とした。

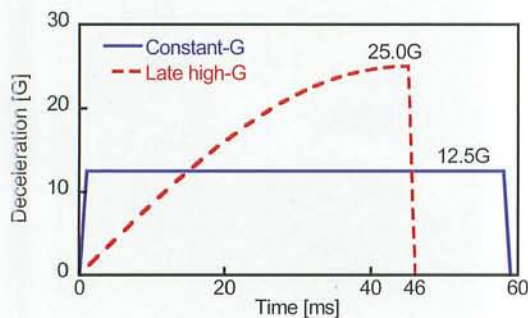


図4 荷重曲線図

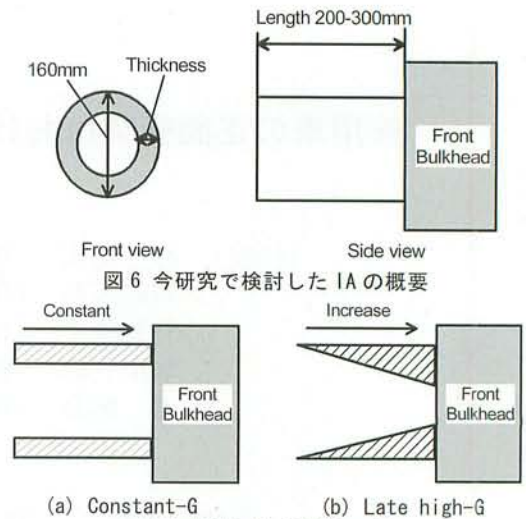


図7 検討した2種類のIA

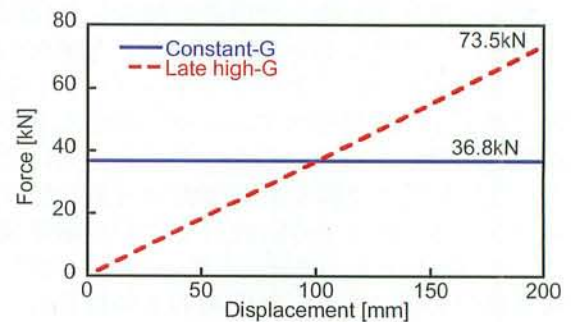


図5 減速加速度の時間推移

### 2.3 傷害基準

今研究では頭部、頸部、胸部の傷害を FMVSS208 の傷害基準により評価した。それぞれの算出方法を以下に示す。

#### 2.3.1 略式傷害尺度 (Abbreviated Injury scale, AIS)

略式傷害尺度では、傷害は以下の6段階に分けられる。

AIS1	Minor (軽傷)	AIS2	Moderate (中等傷)
AIS3	Serious (重傷)	AIS4	Severe (重篤)
AIS5	Critical (瀕死)	AIS6	Unsurvivable (実質的に救命不能)

#### 2.3.2 頭部傷害基準 (Head Injury criteria, HIC)

HIC は近年、自動車衝突試験用ダミーの頭部傷害の評価に用いられている指標である。HIC は式(1)で算出される。

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

$t_1$ : start time [sec],  $t_2$ : finish time [sec],  $a$ : combined

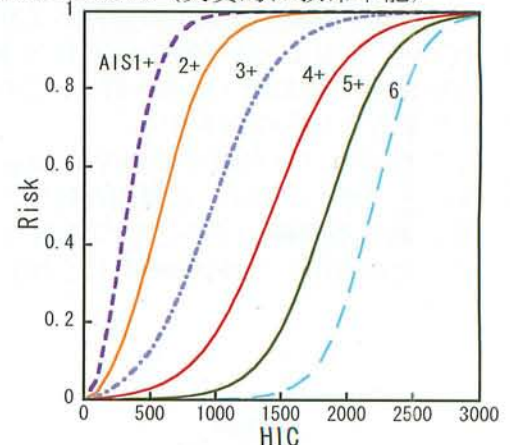


図8 AIS ごとの頭部傷害リスクカーブ



acceleration of three axes of head [G]

HIC は 36ms と 15ms のクリップを使用して、異なる時間  $t_1$  と  $t_2$  により算出される。それぞれ  $HIC_{36}$  と  $HIC_{15}$  とし、FMVSS 208 では  $HIC_{15}$  を使用する。 $HIC_{15}$  が 700 のとき、頭部におよそ 5%の確率で AIS4 傷害が発生することになる (図 8)。

### 2.3.3 頸部傷害基準 (Neck Injury criteria)

頸部には軸力と曲げモーメントを合計した負荷が働くため、頸部の傷害を評価するために  $N_{ij}$  が使用されている。

$$N_{ij} = \frac{F_z}{F_{int}} + \frac{M_y}{M_{int}} \quad (2)$$

$F_x$ : axial force (compression or extension) [N],  $F_{int}$ : intercept of axial force [N] (6806N for extension and 6160N for compression),  $M_y$ : bending moment (flexion or extension) [Nm],  $M_{int}$ : intercept of bending moment [Nm] (310Nm for flexion and 135Nm for extension)

$N_{ij}$  は頸部の傷害危険性を評価するための 1 つの基準である。頸部の傷害基準は以下の通りである。

- 4 つの  $N_{ij}$  値はどんな時も 1.0 を越えてはいけない。
- 上頸部のロードセルで計測される最大引張荷重はどのようなときも 4170N をこえてはならない。
- 上頸部のロードセルで計測される最大圧縮荷重はどのようなときも 4000N をこえてはならない。

$N_{ij}$  はエアバッグにより発生する傷害を評価するために開発された指標であるため、本研究では、このうち、頸部引張及び圧縮力を指標として用いる。

### 2.3.4 胸部傷害基準 (Thoracic Injury criteria)

胸部加速度 (3ms 累積) と胸部たわみを胸部傷害の評価に使用した。AM50 の場合、加速度が 30[G] であるとき、胸部におよそ 25%の確率で AIS4 傷害が発生し、胸部の最大たわみが 92[mm] であるとき、50%の確率で AIS3 の胸部傷害が発生する。

## 3 解析結果・考察

### 3.1 結果

解析結果を図 9, 10, 11 に示す。

頭部傷害基準 ( $HIC_{15}$ ) は、Constant-G の場合は IA の長さが増えるに従って減少した。一方 Late high-G の場合、 $HIC_{15}$  は 270mm のとき極大値を取っている。また、240mm 以下では Constant-G よりも小さくなっている (図 9)。

頸部引張力の曲線は、 $HIC_{15}$  の曲線に似ている。これは、頸部引張力が頭部の挙動に関係していることを意味している。頸部圧縮力は、Constant-G の場合 IA 長が長くなるにつれて小さくなっている。一方で Late high-G の場合は ほとんど一定である (図 10)。

胸部加速度及びたわみは、Constant-G の場合は、IA 長が増えるにつれて小さくなっている。Late high-G の場合は、加速度は IA 長の増加とともに小さくなり、たわみはほぼ一定である。Constant-G におけるこれらの値は、Late high-G よりも小さくなった。Constant-G の胸部加速度は、Late high-G の約 65%の値となった (図 11)。

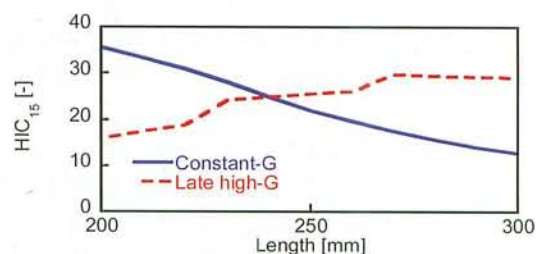
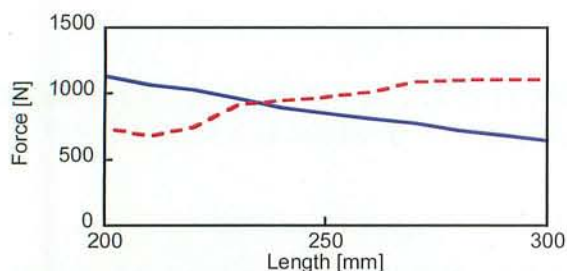
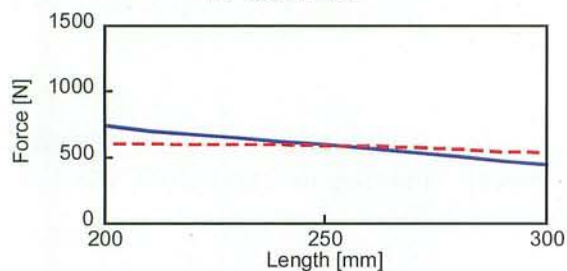


図 9 IA 長に対する  $HIC_{15}$

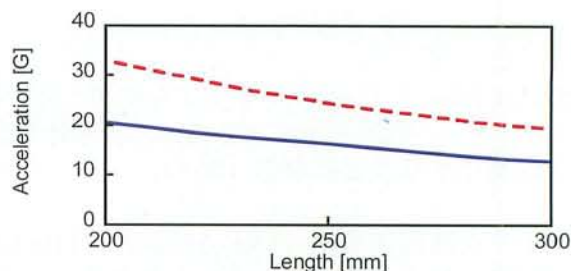


(a) 頸部引張力.

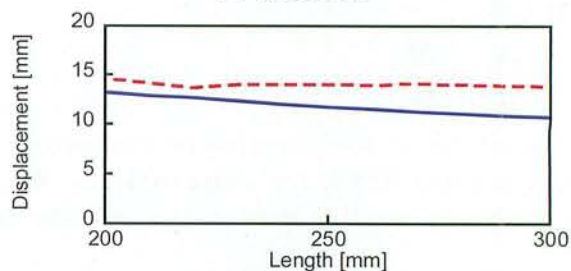


(b) 頸部圧縮力

図 10 IA 長に対する頸部荷重.



(a) 胸部加速度



(b) 胸部たわみ

図 11 IA 長に対する胸部傷害基準

### 3.2 考察

結果として, Constant-G の場合, これらの傷害基準は IA 長の増加とともに小さくなり, より高い安全特性を示した. Late high-G の場合, IA 長についての明らかな傾向は見られなかった. Constant-G を用いて IA を設計することは容易であるが, Late high-G IA を使用する場合, 評価システムを開発する必要がある. これらの傷害基準から判断すると, Constant-G の方が Late high-G よりも安全であると考えられる.

## 4 実験内容

FRP 静的圧壊時の破壊特性の傾向を調査するため, 直径, 積層構成を変化させた試験片を用いて静的圧壊試験を行った. 図 3 は実験におけるプログレッシブクラッシュの様子を示している. プログレッシブクラッシュでは, 破滅的な破砕を起こさずに破壊が進行していく.

### 4.1 円筒の直径寸法変化による影響

FRP 製円筒の吸収エネルギーはその断面積に対して比例関係であるが, 断面積を保ったまま形状を変化させた場合に破壊挙動・吸収エネルギーにどのような変化が発生するのか試験する.

直径の異なる円筒状の型に断面積が一定となるように積層数を調整する. 試験片の寸法は, 直径を  $\phi 60$ ,  $\phi 80$ ,  $\phi 114$ ,  $\phi 151$ ,  $\phi 177$  [mm] と変化させた, 計 5 個とする.

### 4.2 積層構成の変更による影響

一般的に, FRP を用いて構造体を製作する際, 繊維を 0/90 度と  $\pm 45$  度の方向で交互に積層することが多い. しかし, 繊維角度が吸収エネルギーに対してどのような影響を与えるのか, 未だに明らかになっていない. この項目では 0/90 度と  $\pm 45$  度の割合を変化させたモデルを製作し, その破壊挙動・吸収エネルギーの変化について調査を行う.

0 度を円柱の中心軸方向とし, 0/90 度に対する  $\pm 45$  度の繊維の割合を 0%, 25%, 50%, 75%, 100% と変化させた 5



図 12 静的圧壊試験

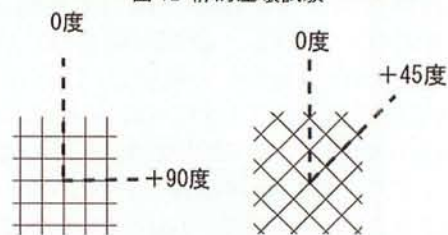


図 13 繊維方向

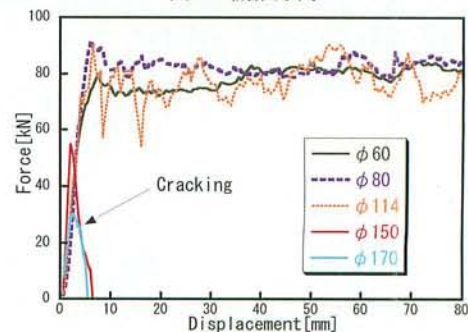


図 14 荷重の推移



つについて試験して判断する。積層数は 20[層]、直径は  $\phi 60$ [mm] に固定する。

## 5 実験結果・考察

### 5.1 円筒の直径寸法変化による影響

$\phi 60$ [mm]、 $\phi 80$ [mm]、 $\phi 114$ [mm] のモデルでは、期待した通りにプロGRESSIVE クラッシュが発生した(図 15-(a), (b))。この際、荷重に大きな変化は見られなかった。ただし、 $\phi 114$  のモデルでは荷重の「ぶれ」が大きく、ストローク 14[mm] 付近では異音とともにストロークの値が急激に変化するなど、安定したエネルギー吸収効果が得られなかった。一方、 $\phi 150$ [mm]、 $\phi 177$ [mm] のモデルでは円周方向の亀裂が発生し、同時に荷重が急激に減少した。

破壊後のモデルを観察すると  $\phi 60$ [mm]、 $\phi 80$ [mm] のモデルでは破壊屑が帯状になって連続しているのに対し、 $\phi 114$ [mm] のモデルでは細かい破壊屑になった(図 15-(c))。

$\phi 150$ [mm]、 $\phi 177$ [mm] のモデルで亀裂が発生した原因としては、モデルの直径に対する肉厚(厚み/直径)が小さくなりすぎたためであると考えられる。円筒の直径を増加させていった場合、局所的にみるとその荷重に耐える部位は板状に近くなる。これによって荷重に対して座屈・せん断の応力が発生し、想定外の破壊挙動が発生しやすくなったと考えられる。

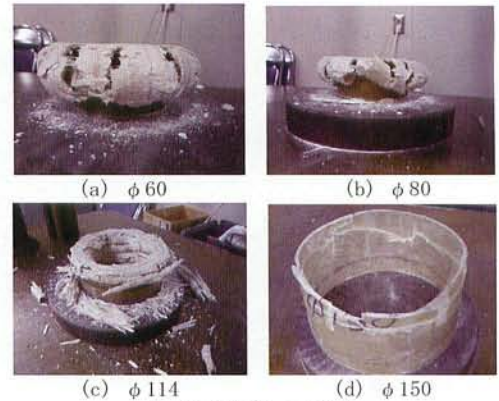


図 15 破壊後の試験片

表 1 円筒の直径寸法変化におけるモデルの詳細と結果

試験モデル名称	$\phi 60$	$\phi 80$	$\phi 114$	$\phi 150$	$\phi 177$
直径[mm]	60	80	114	150	177
積層数[層]	30	23	16	12	10
断面積[mm <sup>2</sup> ]	961	982	974	961	944
質量[g]	169	178	183	174	180
破壊部質量[g]	113	119	122	116	120
繊維質量割合[%]	49	45	45	44	44
吸収エネルギー[kJ]	6.1	6.4	5.9	—	—
重量比吸収エネルギー[kJ/kg]	54.1	54.0	48.5	—	—
断面比吸収エネルギー[kJ/m <sup>2</sup> ]	6339	6522	6068	—	—
定常破壊時の平均荷重[kN]	78.1	82.1	78.2	—	—
最大荷重[kN]	84.5	91.6	90.2	—	—

### 5.2 積層構成の変更による影響

荷重変移曲線から、 $\pm 45$  度繊維の割合によらず、モデルはストロークに対して安定した荷重を発生させているが、その平均荷重と破壊物体の形状には大きな差異が発生している(図 16)。まず、平均荷重では  $\pm 45$  度繊維が少ないもの、すなわち 0/90 度繊維の割合が大きいモデルでは平均荷重が約 60[kN] に達している。一方、 $\pm 45$  度繊維 50% 以上のモデルでは、平均荷重は大きく減少し 0% や 25% より、30 パーセントほど少ない。また、破壊後のモデルを観察すると、破壊屑が細かな破片に千切れた状態になってモデルの周辺に散乱している(図 17-(a), (b)) のに対し、50%、75% では破壊された部位が花びらのように広がりつつ散乱せずに残ったモデルから分離していない(図 17-(c), (d))。さらに 100% では渦を巻くように破壊後の部位が散乱し、1 つ 1 つの塊が大きい状態で残っている(図 17-(e))。

このことから、破壊挙動とエネルギー吸収量には大きな関係があり、繊維方向に大きく依存していると考えられる。

はく離した材料を「はり」とみなした場合、その「はり」の曲げ変形エネルギーは 0/90 度繊維によって決定されると推測できる。「はり」の変形エネルギーを減衰に使用するには、はりの根元自体が上方からの荷重に対して耐えることができないと推測される。はりの根元を支える役割を果たしているのが、90 度方向の繊維である。0%、25% では 90 度方向の繊維量が多く、はりを十分に固定すること

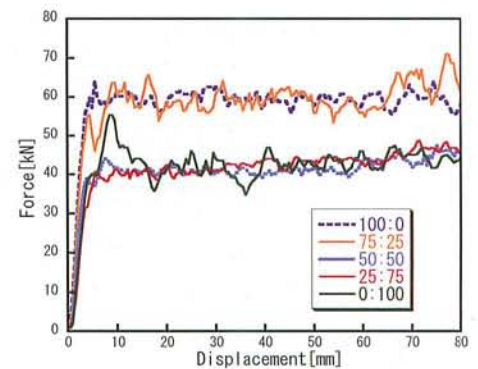


図 16 積層構成による荷重の変化



ができるため、この変形を発生させることができ、重量比吸収エネルギーが高くなったと考えられる。

一方、50%、75%のように90度方向の繊維が少なくなってくると、繊維がはりとして機能する前に根元で折れ、はりとして使用されなかった0度方向の繊維がそのまま内外に排出され、花びらのように広がった破片となった。更に、100%では、90度繊維が全くないため、繊維は容易に外へ飛び出し、渦のように散乱が起きたと考えられる。

この予想が正しいとすれば、はりの根元の強度が一定以上に達すればそこから先端にかけての部位がエネルギー吸収に使用されるようになるはずであり、0%、25%の吸収エネルギーが大きいこととも合致する。

## 6 まとめ

FRPを用いた衝撃吸収構造体を設計するに当たって、Constant-Gタイプの、すなわち肉厚一定の構造体が、より人体損傷を低減させることができることが分かった。

円筒の直径寸法を変化させたとき、直径が小さなものにつ

いて明確な傾向を見出すことは出来なかった。しかし、円筒の厚みに対して直径が大きなものについては、プログレッシブクラッシュを起こさずに円筒壁面に亀裂が発生した。その際、荷重が急激に低下しエネルギー吸収性能は低くなった。

積層構成を変化させたとき、 $\pm 45$ 度方向の繊維量が0%、25%のものとそれ以上のものとで明確な違いが見て取れた。また、ある量の $\pm 45$ 度の繊維を用いて製作を行うことで、発生荷重をコントロールすることも可能である。

今回の研究ではFRP製衝撃吸収構造体を設計するための基礎的データを得ることができた。今後、さらに様々な形状を検討していくことで市販の乗用車にも利用可能な衝撃吸収構造体を製作するこ

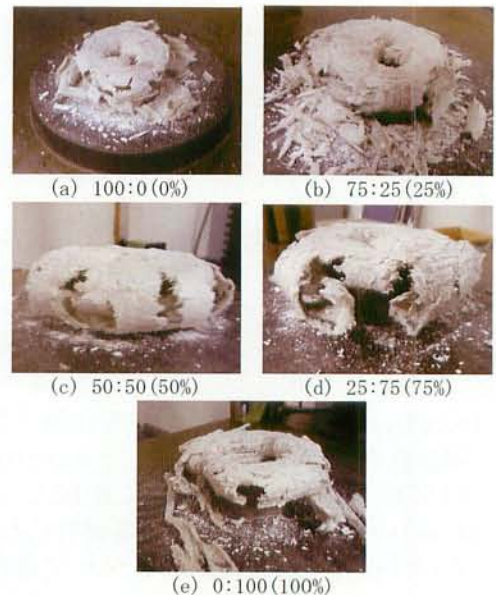


図17 破壊後の試験片

表2 積層構成の変更におけるモデルの詳細と結果

試験モデル名称(0/90度: $\pm 45$ 度)	100:0(0%)	75:25(25%)	50:50(50%)	25:75(75%)	0:100(100%)
直径[mm]	60	60	60	60	60
積層数[層]	20	20	20	20	20
質量[g]	121	118	94	104	114
破壊部質量[g]	79	80	63	69	77
繊維質量割合[%]	47	42	42	48	44
吸収エネルギー[kJ]	4.7	4.7	3.3	3.3	3.4
重量比吸収エネルギー[kJ/kg]	59.2	58.6	52.0	47.9	43.3
最大荷重[kN]	64.2	71.1	47.5	48.8	55.4
0/90度繊維質量[g]	60	48	23	8	0
$\pm 45$ 度繊維質量[g]	0	5	21	46	55
合計繊維質量[g]	60	53	44	54	55
11~70[mm]までの平均荷重[kN]	59.6	59.4	41.3	42.5	42.5

とができると考えられる。

## 7 参考文献

- [1] FMVSS 208, The National Highway Traffic Safety Administration, 1998
- [2] “Frontal Offset Crashworthiness Evaluation Guidelines for Rating Injury Measures”, Insurance Institute For Highway Safety, 2009
- [3] D. Rising, J. Kane, N. Vernon, J. Adkins, C. Hoff and J. Brelin-Fornari, “Analysis of a Frontal Impact of Formula SAE Vehicle”, SAE paper, 2006-01-3627, 2007
- [4] 技術報告シリーズ 37 自動車用エネルギー吸収部材へのFRP適用の基礎検討—FRP薄肉円筒の軸圧縮特性—, 社団法人自動車技術会 構造強度部門委員会 構造用FRPワーキンググループ, 2002
- [5] 工学技術者と医療従事者のためのインパクトバイオメカニクス —交通事故で人はどのようにして怪我するのか?—, 社団法人自動車技術会 インパクトバイオメカニクス部門委員会, 2006