

一段式ガスガンを用いた 複合材料の耐衝撃性

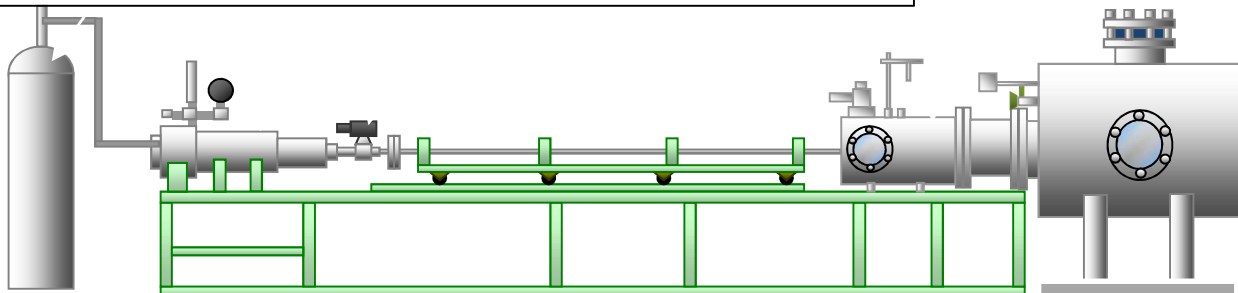
新井 和吉

(法政大学 理工学部 機械工学科)

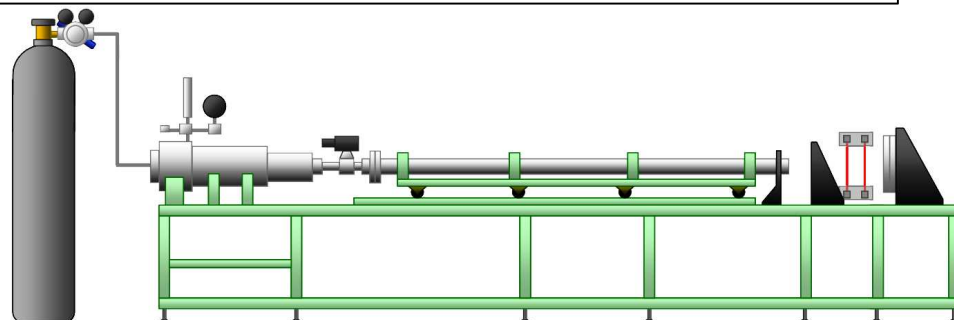
「日本における超高速衝突実験の現状と将来展望」
惑星科学研究センター, 2011/12/12

法政大学新井研所有の一段式ガスガン(3台)

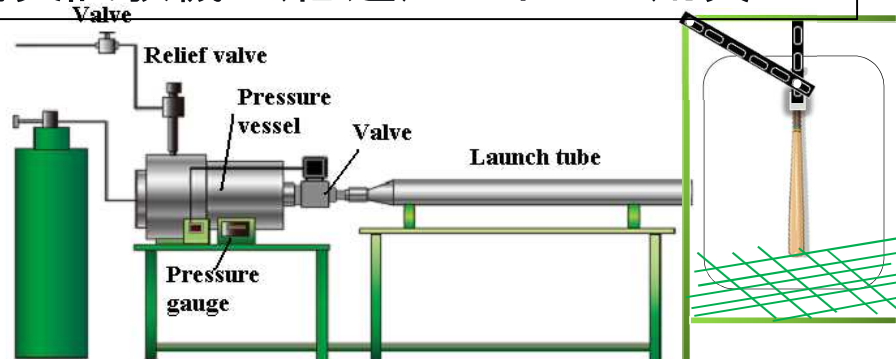
衝突試験機A(高速):スペースデブリなど



衝突試験機B(中速):バードストライクなど



衝突試験機C(低速):スポーツ用具など



駆動ガス:

ヘリウム, 窒素, 二酸化炭素

加速管内径:

A: $\phi 10.0\text{mm}$, 22.1mm

B: $\phi 45.3\text{mm}$

C: $\phi 72.1\text{mm}$

(軟式ボール128g, $\phi 68\text{mm}$)

$\phi 76.6\text{mm}$

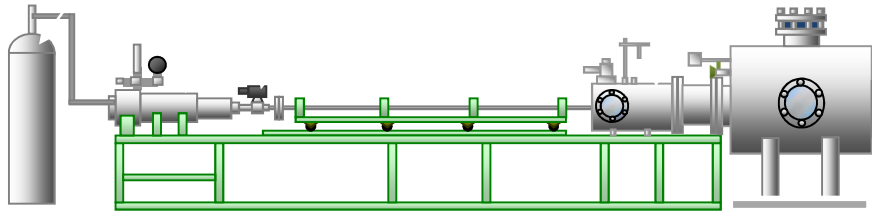
(硬式ボール145g, $\phi 74\text{mm}$)

$\phi 102.3\text{mm}$

(ソフトボール185g, $\phi 96\text{mm}$)

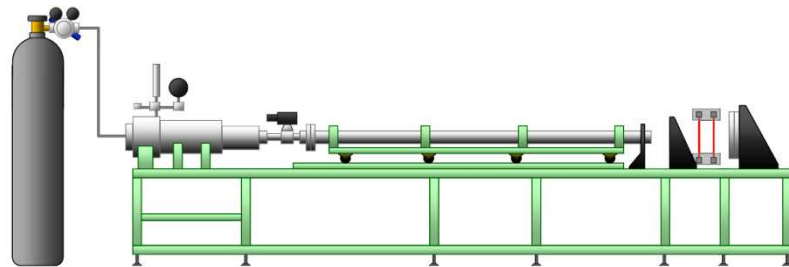
衝突試験機を利用した主な研究テーマ

衝突試験機A(高速)



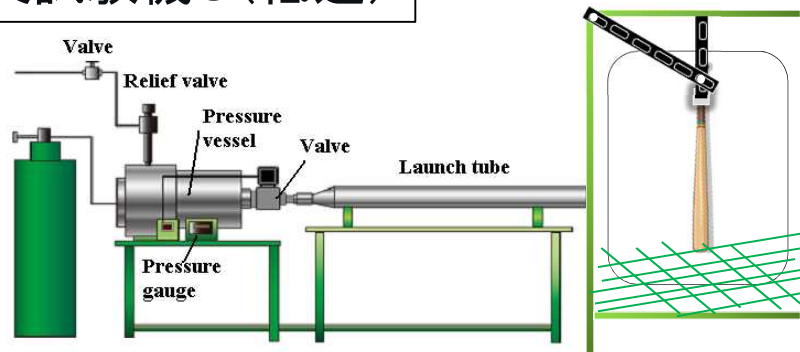
- 液体およびCFRPを用いたスペースデブリシールドの性能評価
- セラミックスへの微粒子衝突損傷

衝突試験機B(中速)



- CFRPのバードストライクによる損傷特性
- 航空機用CFRPの平板高速斜め衝突損傷
- バードストライク実験における模擬鳥材料の検討

衝突試験機C(低速)



- CFRP製硬式野球用ヘルメットの性能評価
- 硬式用バット・FRP製ソフトボールバットの反発特性

液体およびCFRPを用いたスペース デブリシールドの性能評価

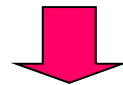
高橋、柴田、新井、長谷川：平成22年度スペースプラズマ研究会(CD-ROM), 2(2011)
高橋、新井、島田：第54回宇宙科学技術連合講演会講演集(CD-ROM), 3I01(2010)

研究背景

宇宙開発や国際宇宙ステーション[ISS]の建設など人類の宇宙での活動は活発になっている



人工衛星から欠落したボルトや塗料、使用済みの衛星等、**スペースデブリ**と呼ばれる宇宙のゴミが増加している



スペースデブリは低軌道で**約7~8km/s**という非常に速い速度で周回しているため、**質量が小さくても宇宙構造物に衝突した場合、大きな被害をもたらす危険性がある**

研究背景

スペースデブリの防御方法

- ・直径10cm以上

地上から観測可能 → 宇宙構造物の軌道を修正

- ・直径1cm未満

地上から観測不可能 → 既存のシールドで防御可能

- ・直径1~10cm

地上から観測困難 → 既存のシールドでは防御困難

既存のスペースデブリシールド



バンパ  1.27mm厚Ti合金6061-T6

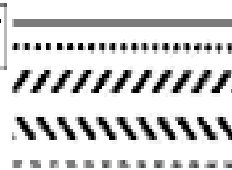
与圧壁  Ti合金 2219-T87 4.8mm厚

ホイップルシールド

http://iss.sfo.jaxa.jp/iss/kibo/develop_status_09_e.html



バンパ  1.27mm厚Ti合金6061-T6

スタッフィング  MLI(多層断熱材)
アルミメッシュ
3 Nextel AF62(セラミック)
4 Kevlar 710
Kapton

与圧壁  Ti合金 2219-T87 4.8mm厚

スタッフィングホイップルシールド

http://iss.sfo.jaxa.jp/iss/kibo/develop_status_09_e.html

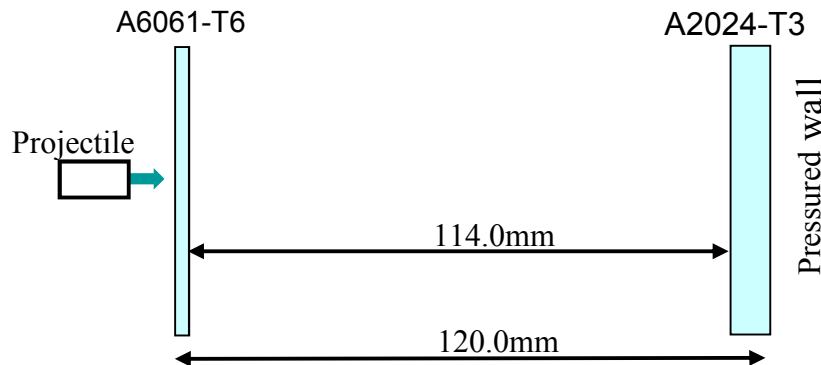
シールドに求められる性能

- 直径1~10cmのデブリを防御可能なシールドが必要である
- 打ち上げによる輸送経費の削減のために軽量化が必須である

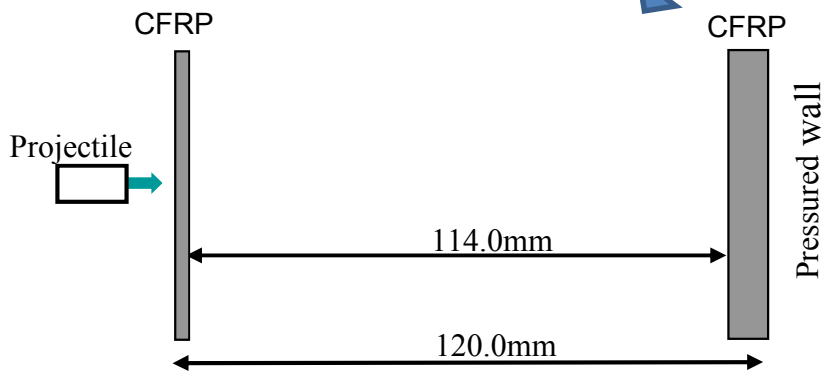
研究目的

スペースデブリシールドの防御性能を向上させ、
かつ軽量化を図ったシールドの開発

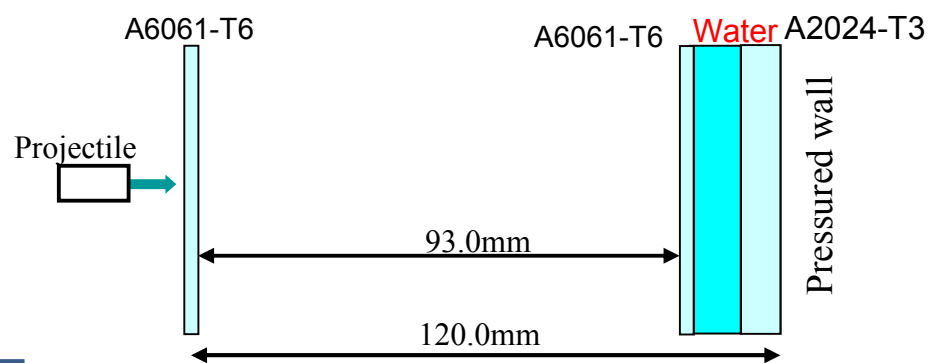
ホイップルシールド



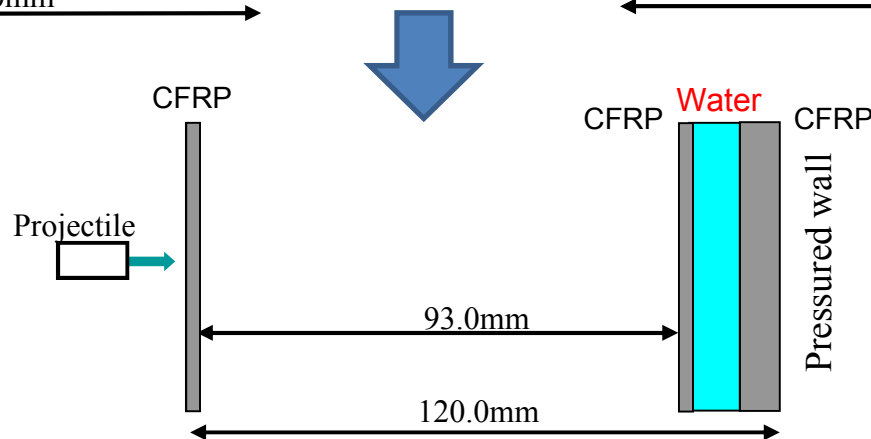
軽量化:
構成材料をCFRPに



防御性能の向上:
構成材料に液体を用いる

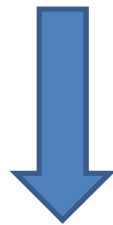


液体およびCFRPを
用いたスペースデブリシールド



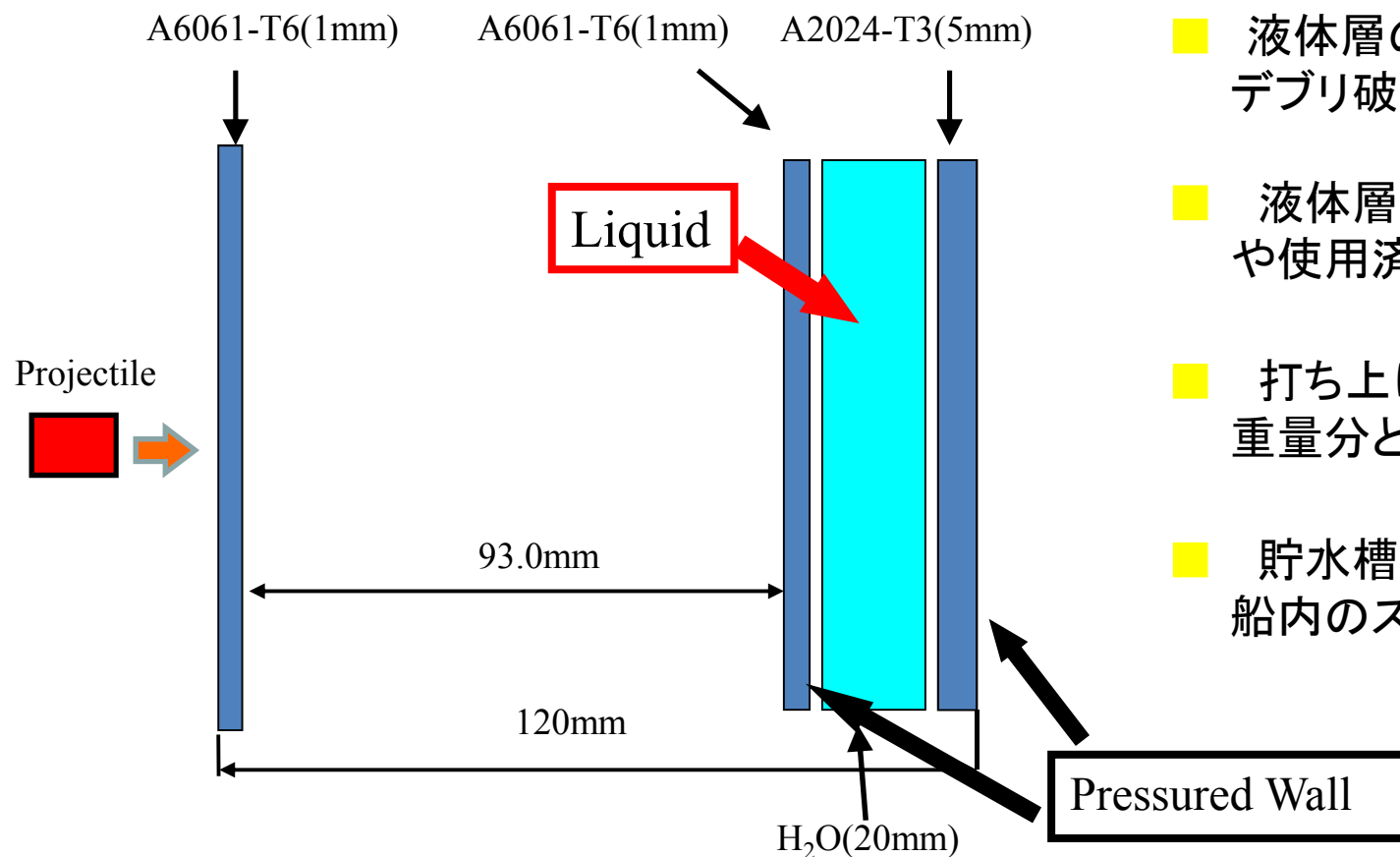
■ 一段式ガスガンを用いて

- 各構成材料単体での衝突実験を行い、貫通限界速度や、衝突時の材料物性パラメータの取得
- ホイップルシールドの貫通限界曲線の数値解析
- スモールスケール(3/10スケール)の、液体およびCFRPを用いたスペースデブリシールドを作製し、液体層の厚さを変化させた場合の貫通限界速度の測定



- ISAS/JAXAの2段式軽ガスガンを用いて、実スケールでの衝突実験

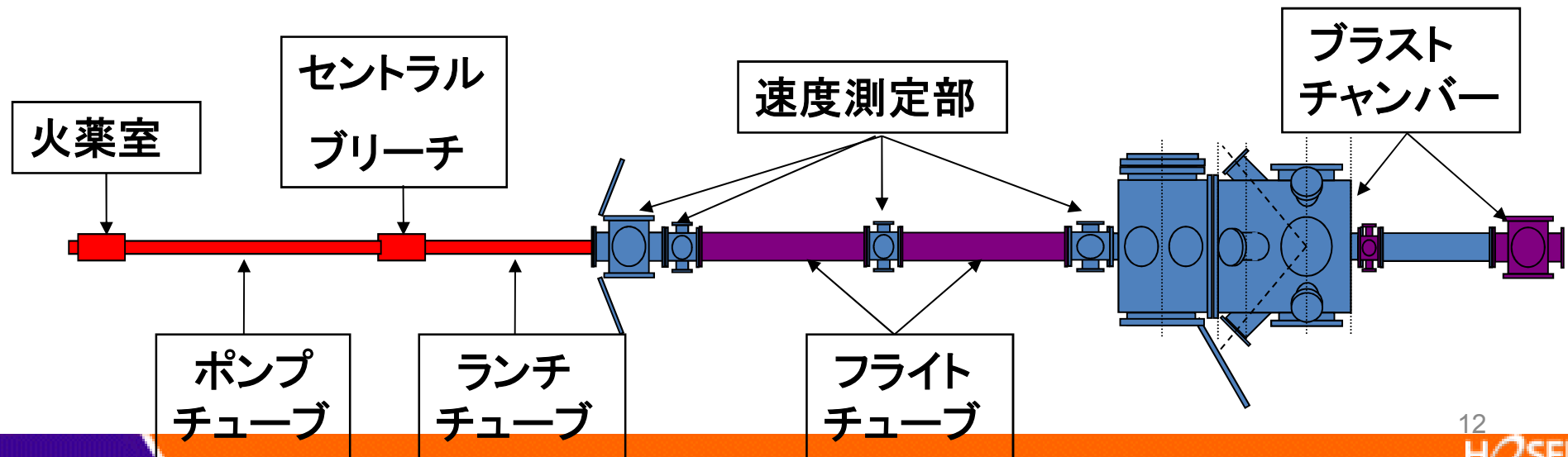
液体を用いたシールド



- 液体層の慣性抵抗によるデブリ破片の減速効果を利用
- 液体層には飲料水などの液体や使用済みの廃液などを想定
- 打ち上げの際にはシールドの重量分としては付加されない
- 貯水槽としても兼用できるため船内のスペース拡大可

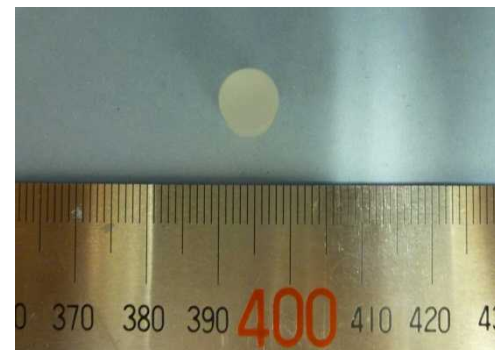
実験装置

二段式軽ガスガン (ISAS/JAXA)



飛翔体

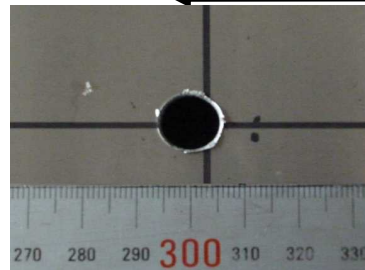
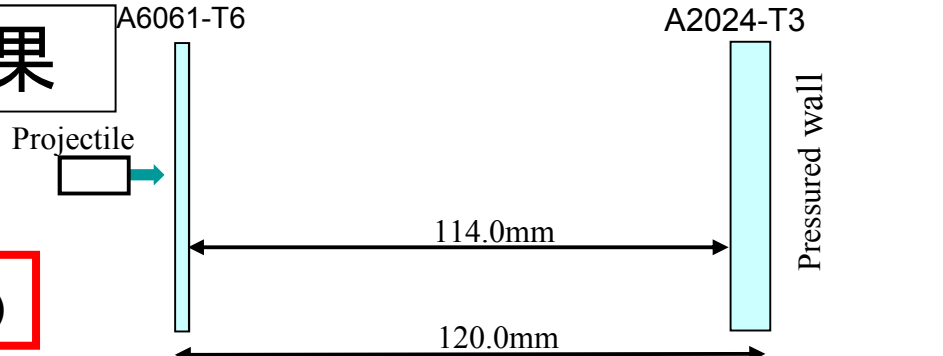
- 材質PC (円柱型)
直径7mm 長さ14mm
スカート部 7.15mm
- 質量 0.64g
- 衝突速度範囲
5.3~5.9km/s



液体層の効果

ホイップルシールド

面密度: 16.55(kg/m²)



Hole φ11.2mm



Hole φ16.2mm

H₂O(20mm)

$v=5.382$ km/s

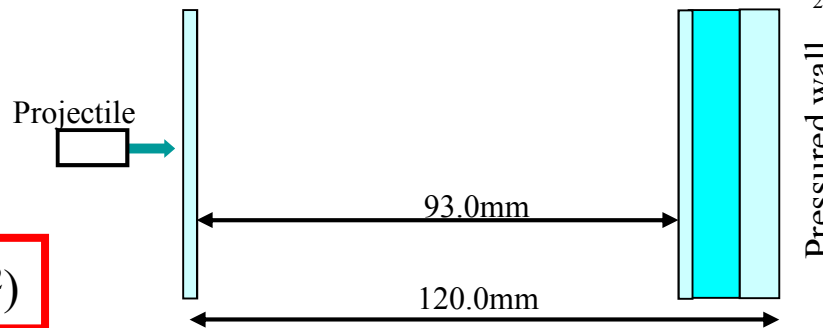
貫通

AUTODYN-解析結果

最小貫通限界速度
1.3~1.4km/s

ホイップルシールド
+液体層

面密度: 19.25(kg/m²)



Hole φ11.3mm



Hole φ164.6mm



Dent H3.8mm

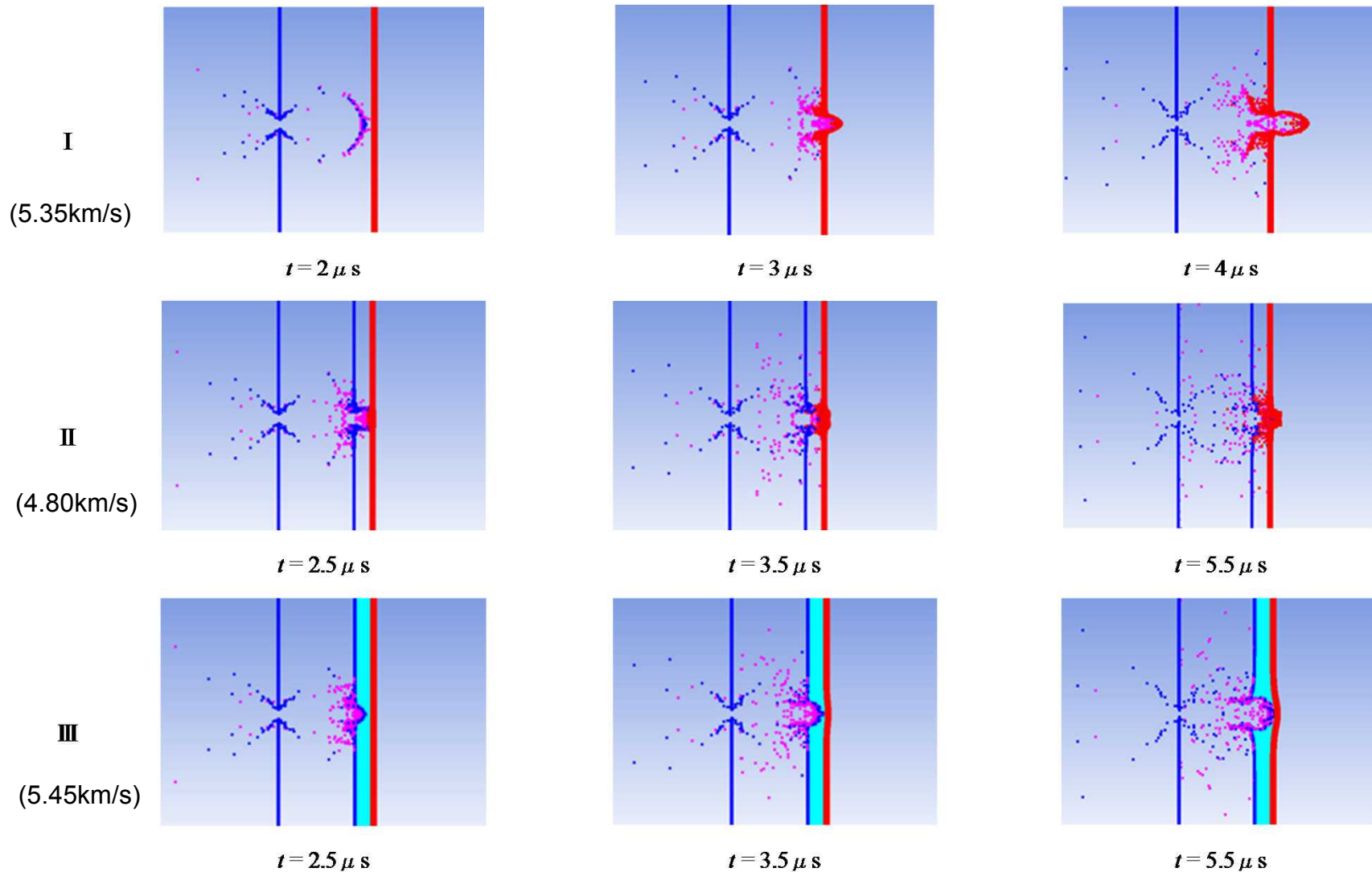
$v=5.449$ km/s

非貫通

AUTODYN-解析結果

最小貫通限界速度
6.4~6.5km/s

液体層の効果



数値解析による各シールドの損傷過程
(液体層の効果)

CFRPによる軽量化

板厚	炭素繊維	エポキシ	積層構成	積層枚数
t=1mm	T700	#2500	$[(0/90)_2]_s$	8ply
t=5mm	T700	#2500	$[(0/90)_{10}/0]_s$	42ply

	密度(kg/m ³)
アルミニウム合金	2700
CFRP	1555

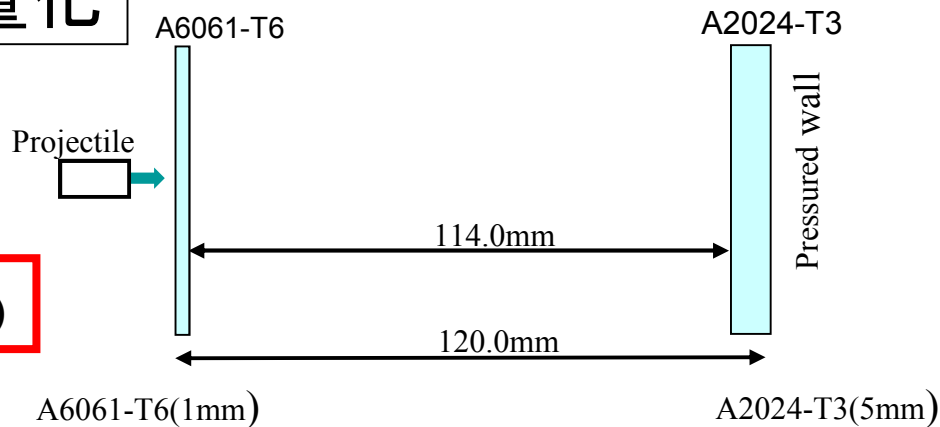


アルミニウム合金よりも約**42%**軽量

CFRPによる軽量化

ホイップルシールド

面密度: 16.55(kg/m²)



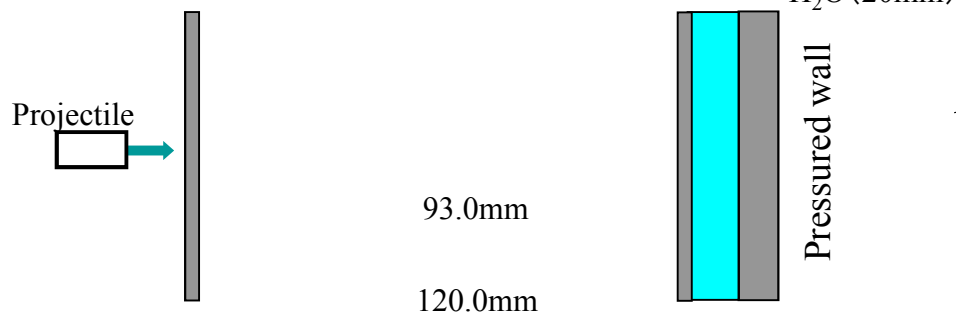
$v=5.382$ km/s

貫通

CFRP+液体層

アルミ使用時: 19.25(kg/m²)

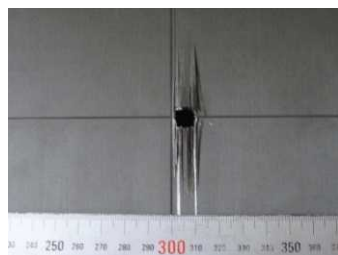
面密度: 10.92(kg/m²)



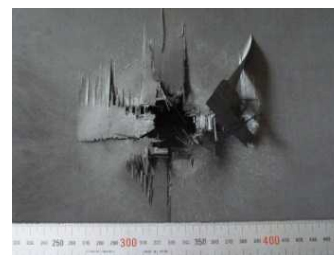
$v=5.521$ km/s

非貫通

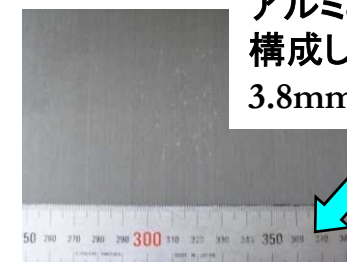
アルミニウムと液体で構成したシールドは3.8mmのへこみ



Hole Sq9.1×9.7mm

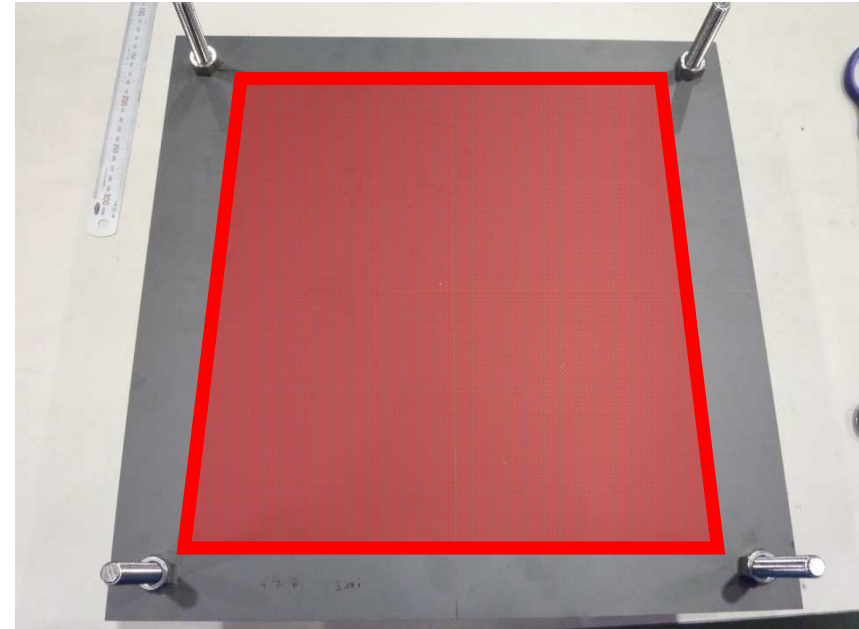


Hole φ35.9mm



No damage

CFRP与压壁の超音波探傷試験



三次元超音波検査装置
Matrixeye™ EX (東芝 電力システム社(株))

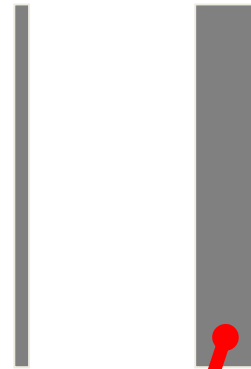
CFRP与压壁の超音波探傷

ホイップルシールド
(CFRP)

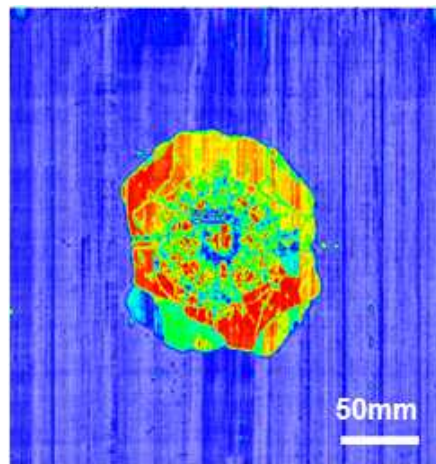
アルミ使用時: 16.55(kg/m²)



面密度: 9.36(kg/m²)



後面与压壁

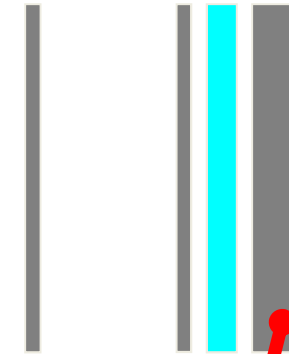


CFRP+液体層

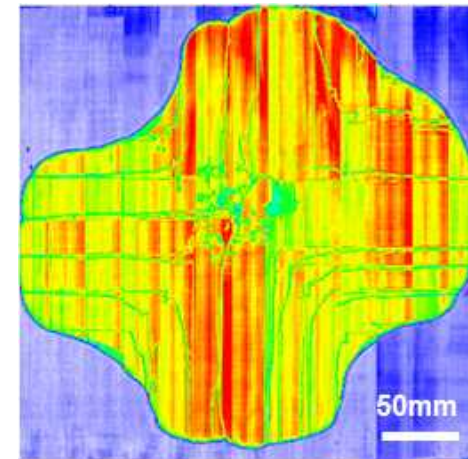
アルミ使用時: 19.25(kg/m²)



面密度: 10.92(kg/m²)



後面与压壁

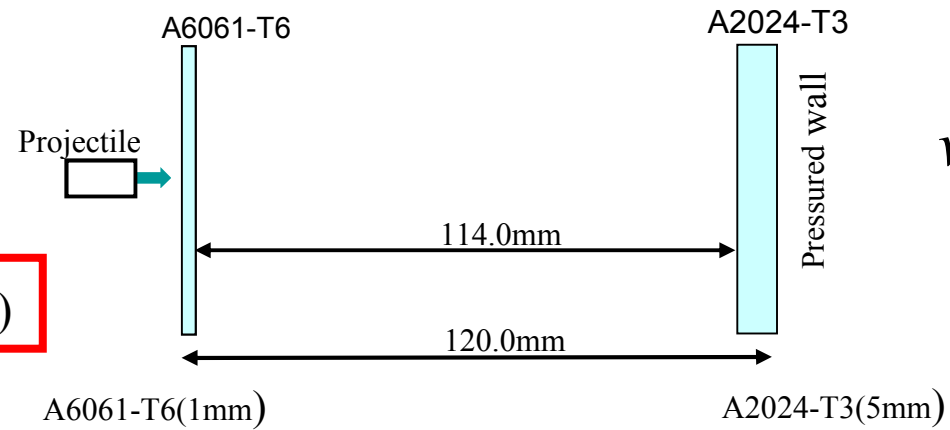


CFRPは内部損傷が発生すると強度が低下する

後面与压壁にはAl合金の方が適している

ホイップルシールド

面密度: 16.55(kg/m²)



v = 5.382 km/s

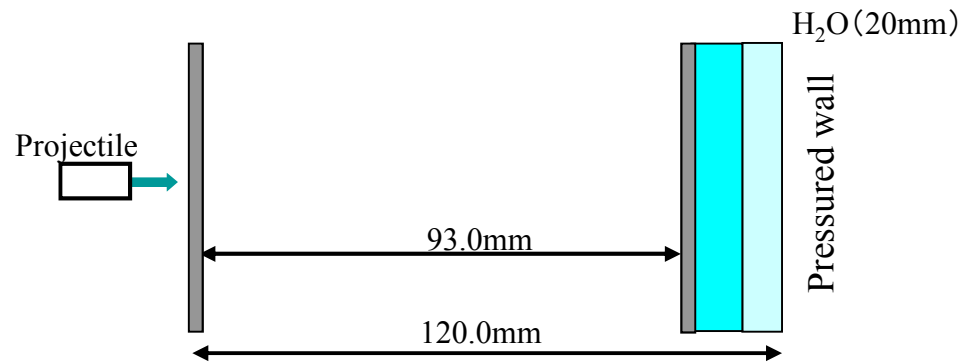
貫通

後面与圧壁のみをAL合金

アルミ使用時: 19.25(kg/m²)



面密度: 16.97(kg/m²)



v = 5.552 km/s

非貫通



Hole Sq9.6 × 8.6mm



Hole φ37.4mm



Dent H0.9mm

結論

- ① シールド内部に**液体層**を付加したシールドは**防御性能が大幅に向上**することが確認された
- ② 超音波探傷試験の結果から、**後面与圧壁**には**Al合金**の方が望ましい
- ③ シールド前面に**CFRP**を用いることによって**軽量化**がなされ、さらに**防御性能の向上**が確認された

軟体衝突におけるCFRPの 損傷挙動 (バードストライク)

小峰, 杉目, 梶原, 新井: 航空宇宙技術, vol.10, pp.11-17(2011)

小峰, 杉目, 新井, 梶原, 福重: 日本航空宇宙学会 第52回構造強度に関する講演会講演集, pp.1-3(2010)

研究背景

- 航空機は異物と衝突することがあり、中でも鳥との衝突(バードストライク)は高速度・高重量という条件のため最も危険である
- CFRPは航空機用材料として盛んに使用されており、今後CFRPをエンジン部材等、より重要な場所で使用するためには、バードストライクによる損傷機構を明らかにし、より耐衝撃性の高いCFRPを開発する必要がある

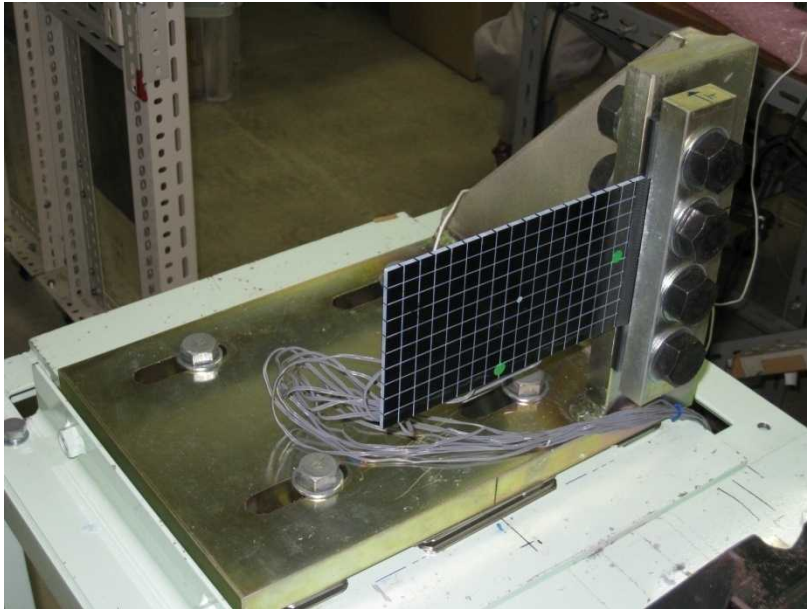
研究目的

- 強化繊維およびマトリックス樹脂を変化させた3種類のCFRP積層板を用い、鳥を模擬した軟体球を衝突させ、衝突エネルギーおよび衝突角度がCFRP積層板の耐衝撃性に及ぼす影響を検討
- 有限要素解析を行い、軟体球衝突のCFRP積層板の損傷機構について検討

実験概要

垂直衝突試験

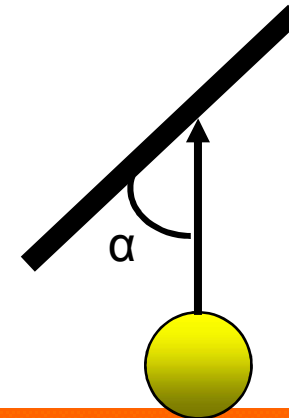
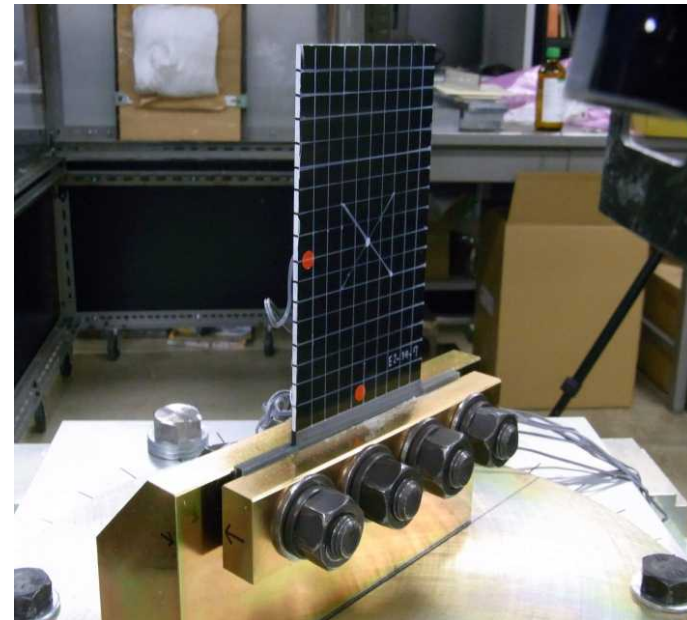
CFRPの繊維、マトリックス樹脂の影響を調査



斜め衝突試験

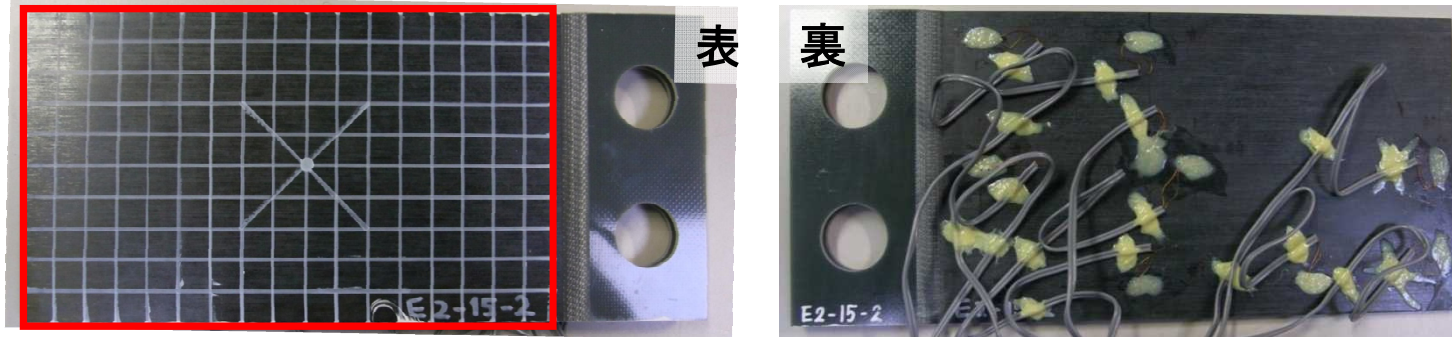
衝突角度 α : 30° 45° 60° 75° 90° (垂直衝突)

衝突角度の影響を調査



試験片

ターゲットエリア



試験片寸法: 220 × 100mm (ターゲットエリア180 × 100mm)
裏面9箇所にはひずみゲージを貼り, 衝突時の動ひずみを測定

高強度・高靱性

Type	T700/2500	T800/2500	T800/3900
Fiber	T700	T800S	T800S
Matrix resin (Epoxy)	#2500	#2500	#3900-2B
Stacking sequence	$[(0/45/0/-45)_2]_s$ 16ply	$[(0/45/0/-45)_s]_s$ 16ply	$[(0/45/0/-45)_2]_s$ 16ply
Average thickness	2.64mm	2.98mm	3.05mm
Tensile strength (fiber)	4900MPa	5490MPa	5490MPa
Elastic modulus (fiber)	230GPa	294GPa	294GPa

飛翔体

ゼラチン(新田ゼラチン(株))

直径約25mm
質量約9.0gの球体



高密度ポリエチレン製のサボ



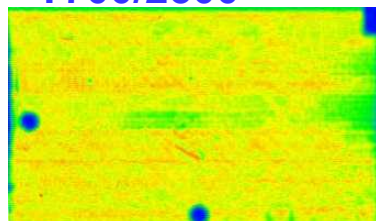
実験結果(垂直衝突)

超音波探傷試験結果

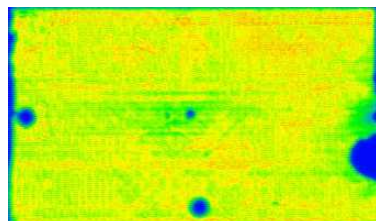
※青色の濃い領域が損傷部分

左側:固定端, 右側:自由端

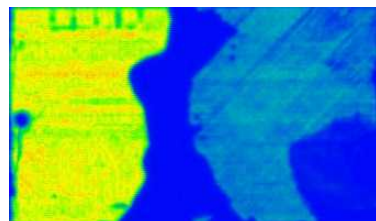
T700/2500



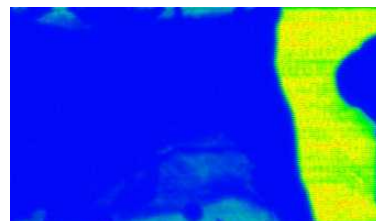
$E=33.8\text{J/mm}$



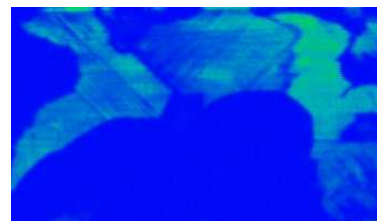
$E=38.4\text{J/mm}$



$E=38.7\text{J/mm}$

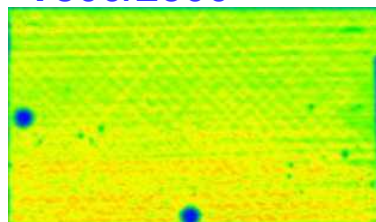


$E=51.3\text{J/mm}$

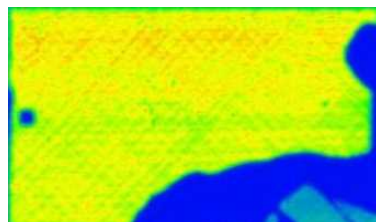


$E=76.3\text{J/mm}$

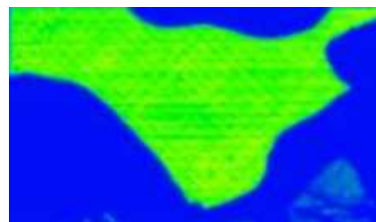
T800/2500



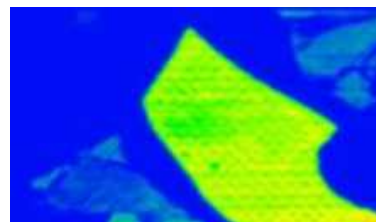
$E=32.8\text{J/mm}$



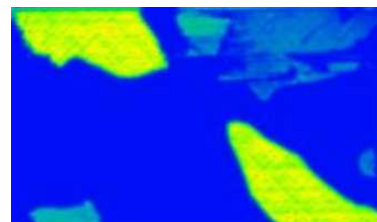
$E=37.6\text{J/mm}$



$E=57.2\text{J/mm}$

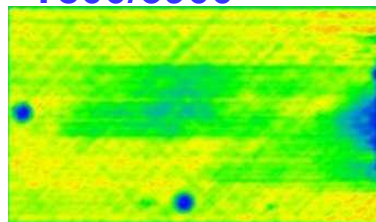


$E=73.5\text{J/mm}$

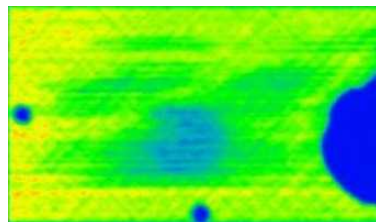


$E=85.5\text{J/mm}$

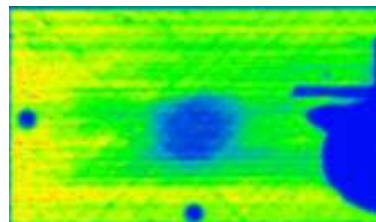
T800/3900



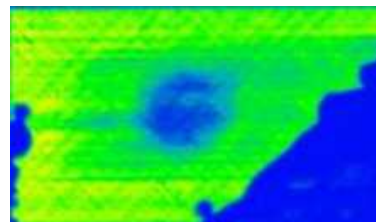
$E=57.2\text{J/mm}$



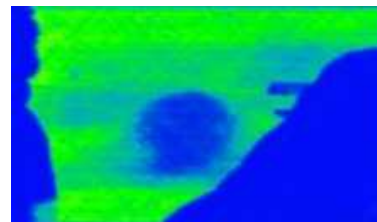
$E=73.3\text{J/mm}$



$E=110.4\text{J/mm}$

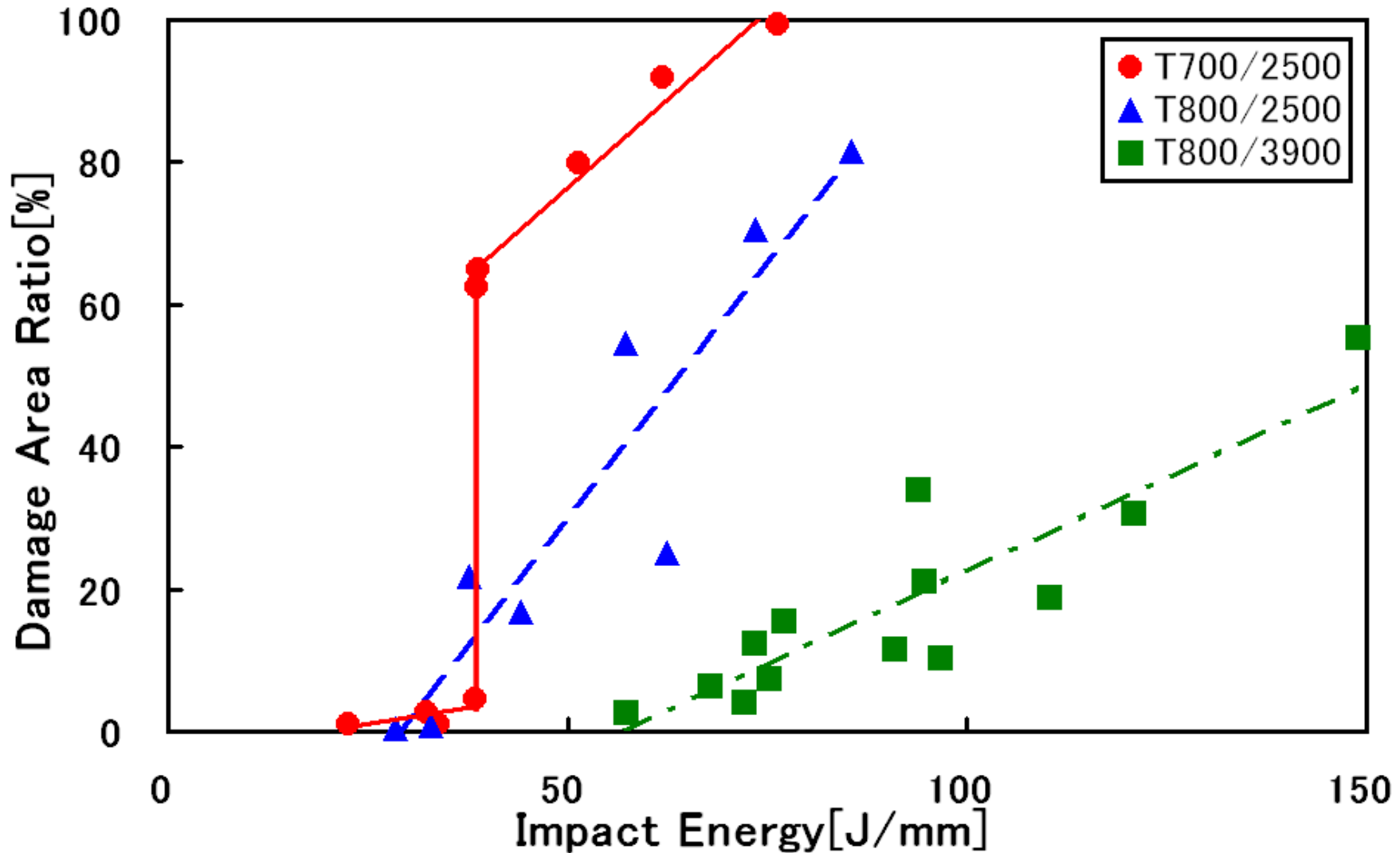


$E=120.8\text{J/mm}$

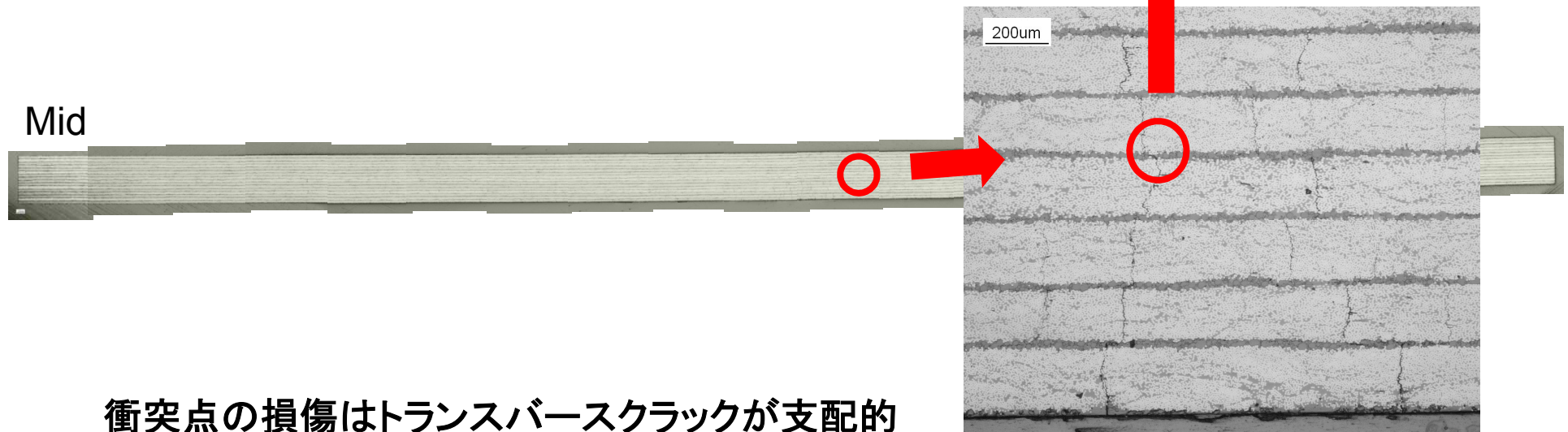
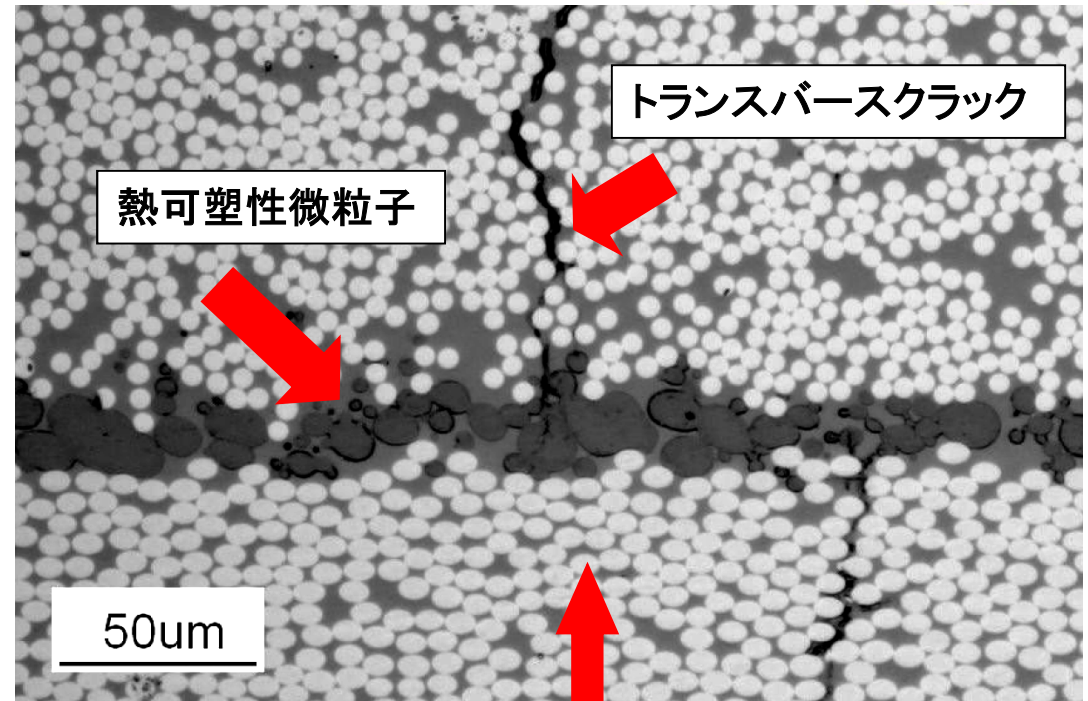
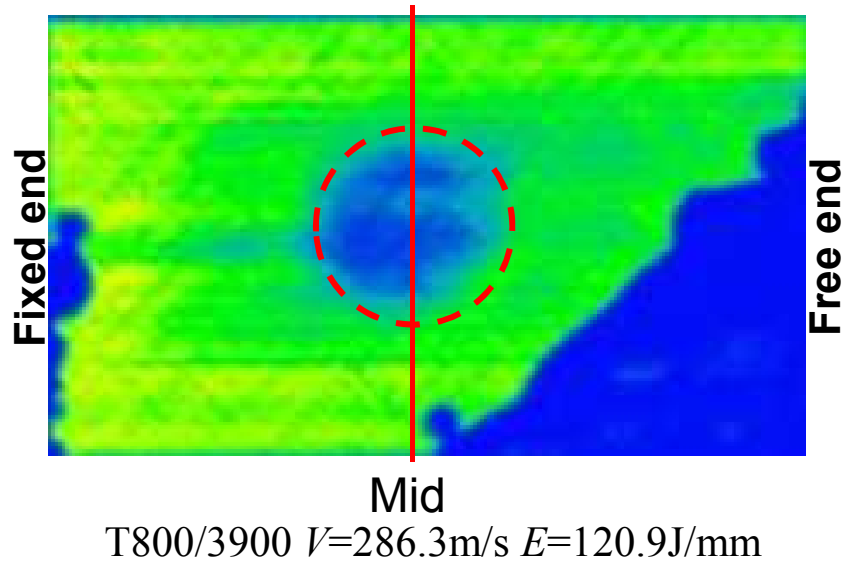


$E=148.9\text{J/mm}$

衝突エネルギーと損傷面積率の関係

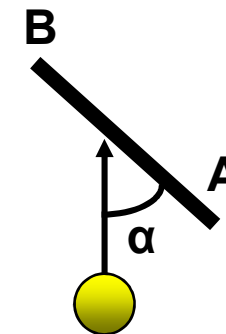
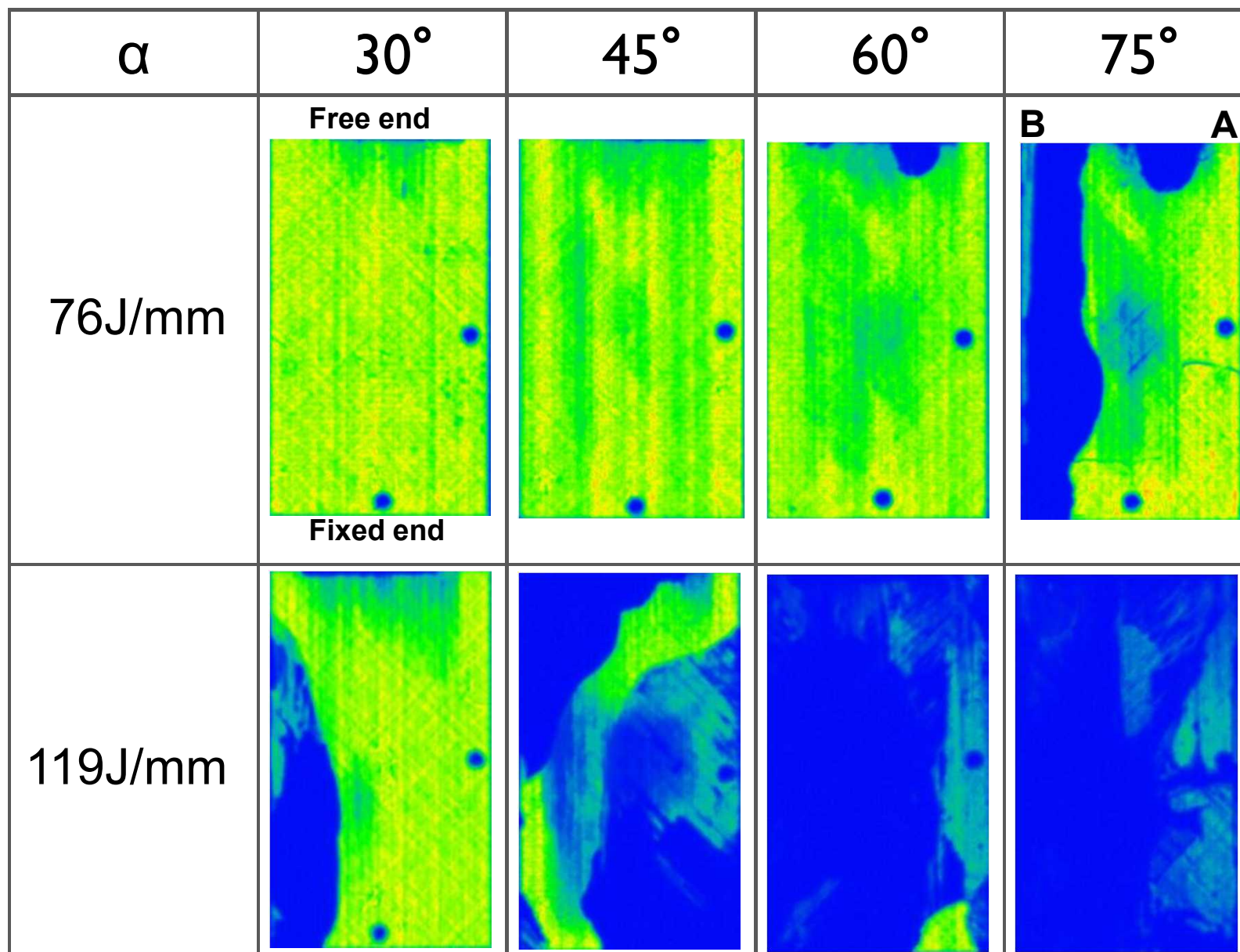


試験片断面観察

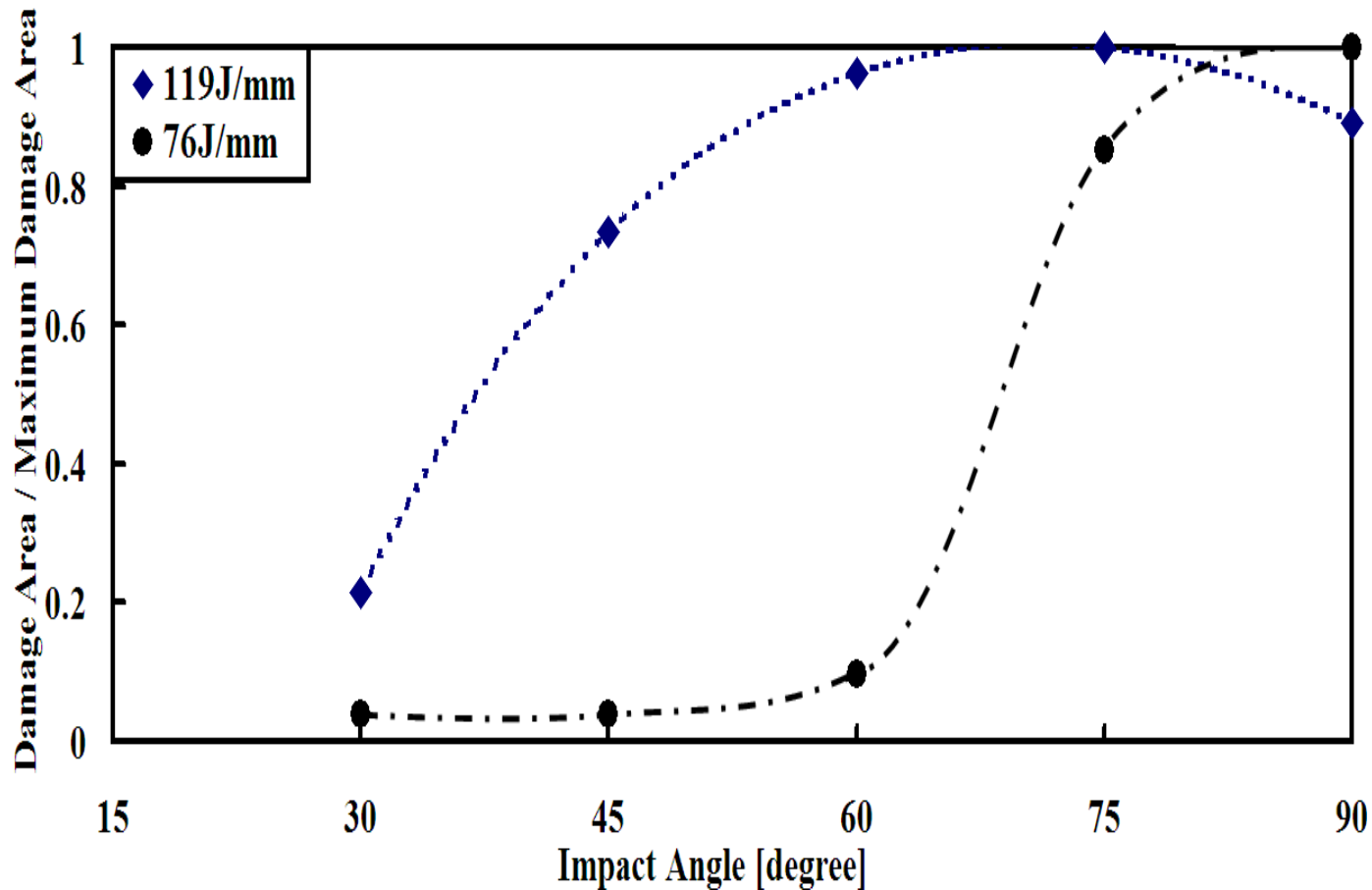


衝突点の損傷はトランスバースクラックが支配的

斜め衝突による超音波探傷試験結果



斜め衝突による 規格化損傷面積率－衝突角度 ($E=76\text{J/mm}, 119\text{J/mm}$)



試験片の損傷は
衝突速度の垂直
成分が影響する
脆性的損傷

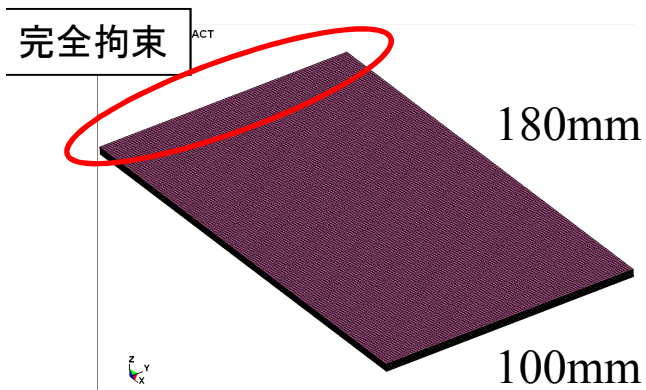
衝突エネルギーが高くなるほど衝突速度の
水平成分の影響が大きくなると考えられる

数値解析: 衝突解析コード: LS-DYNA

CFRPと軟体球の衝突現象を再現


応力分布よりCFRPの損傷機構について検討

CFRP試験片のモデル化 (T800/2500)



8節点ソリッド要素

要素数: 288,000

 1×1×(板厚/16)mm

一層ごとソリッド要素でモデル化各層の繊維方向, 繊維直交方向, 面外方向に縦弾性係数・せん断弾性係数・ポアソン比を定義

T800S/2500	ρ[kg/m ³]	Ea[GPa]	Eb[GPa]	Ec[GPa]			
	1598	171.7	8.8	8.8			
	vba	vca	vcb	Gab[GPa]	Gbc[GPa]	Gca[GPa]	
	0.02	0.02	0.34	4500	2400	4500	

ρ: 密度 E: 縦弾性係数 v: ポアソン比 G: せん断弾性係数
a: 繊維方向 b: 繊維直交方向 c: 板厚方向

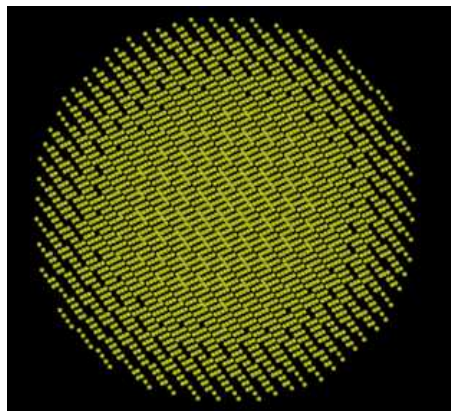
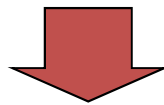
層間剥離のモデル化

Dycoss 離散クラックモデル

$$\left(\frac{\max(\sigma_n, 0)}{T} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{S(1 - \sin \phi \min(0, \sigma_n))} \right)^2 = 1$$

T [MPa]	S [Mpa]	Φ [degree]
80	120	80

軟体球のモデル化



SPH要素
(Smoothed Particle Hydrodynamics)
要素数: 3544

組成がほぼ水
高速衝突時に流体的な挙動



均質な圧縮性流体と考え
密度を $1,000\text{kg/m}^3$
ゼラチン球を再現

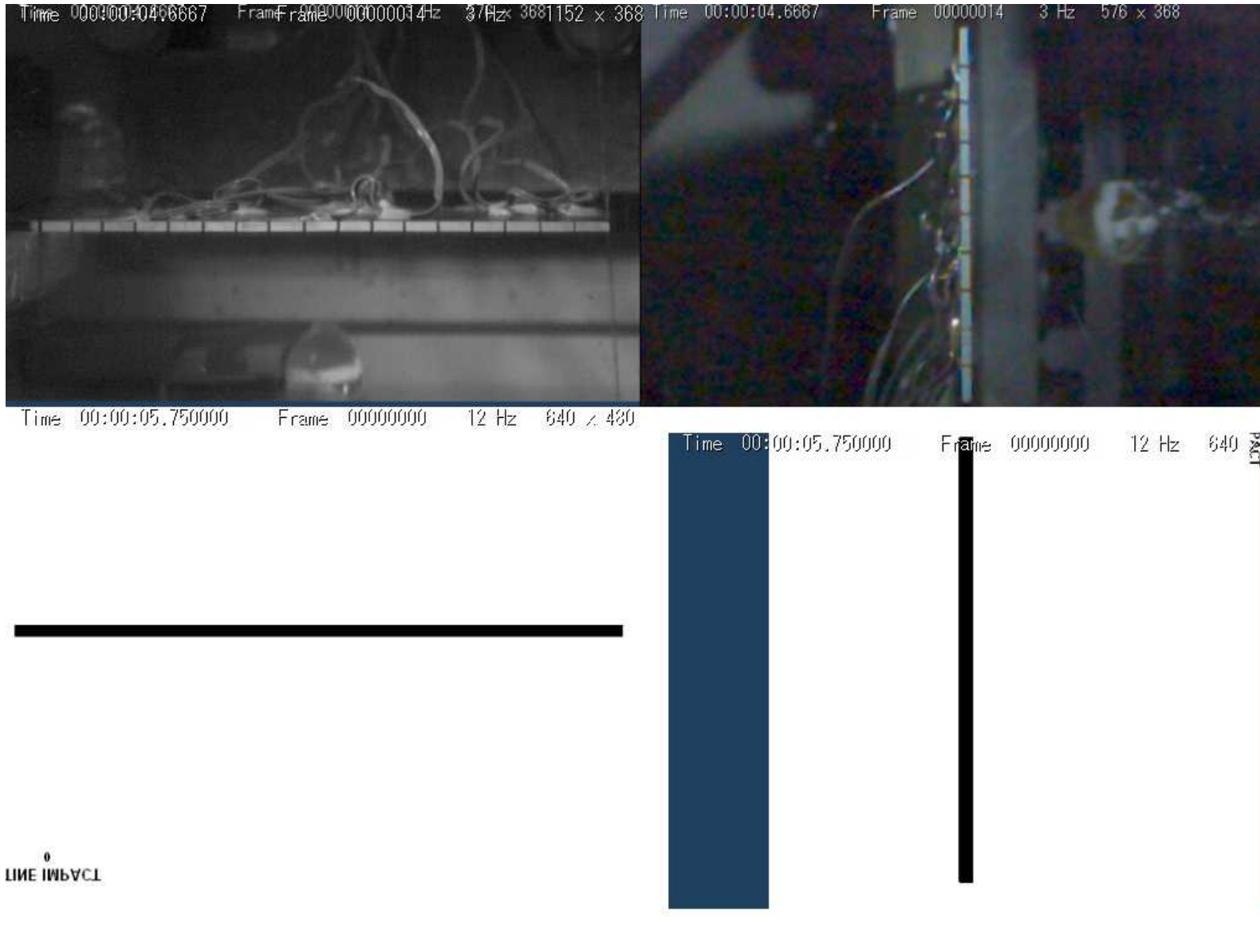
$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3$$

$$\left. \begin{array}{l} C_0 = 0.0\text{MPa} \\ C_1 = 2068.0\text{MPa} \\ C_2 = 5500.0\text{MPa} \\ C_3 = 15500.0\text{MPa} \end{array} \right\} \mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$$

P : 圧力 C : 定数 ρ_0 : 初期密度 ρ : 密度

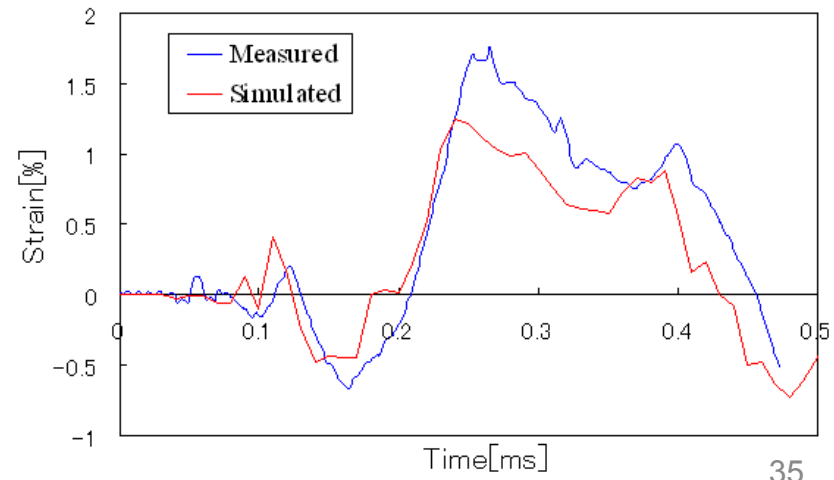
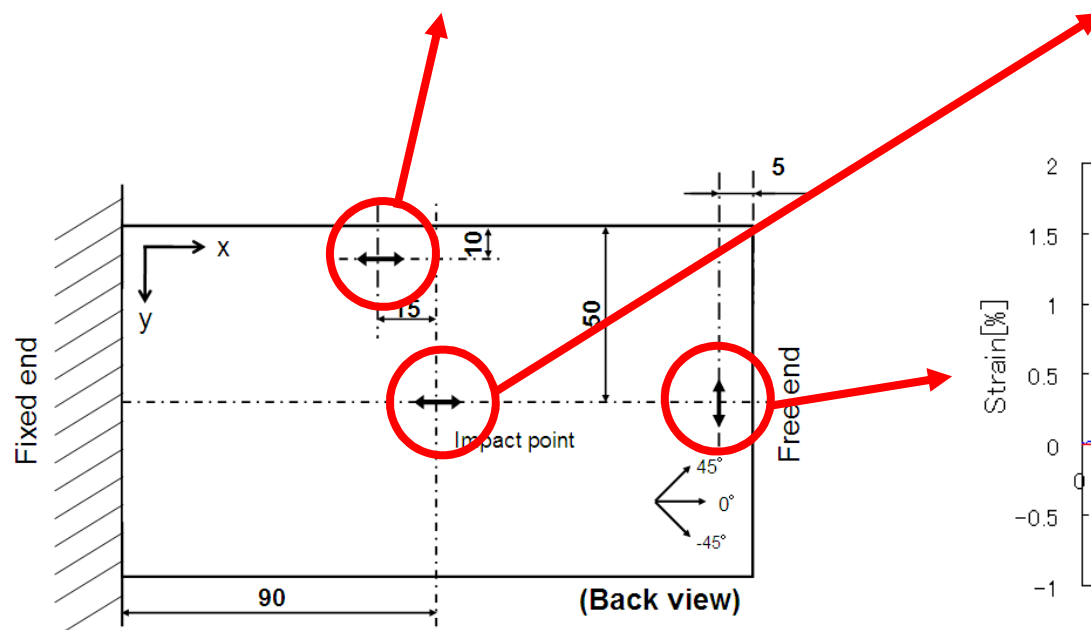
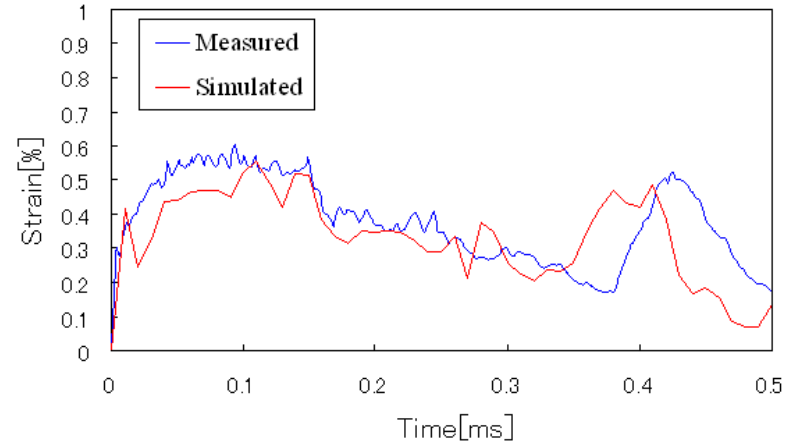
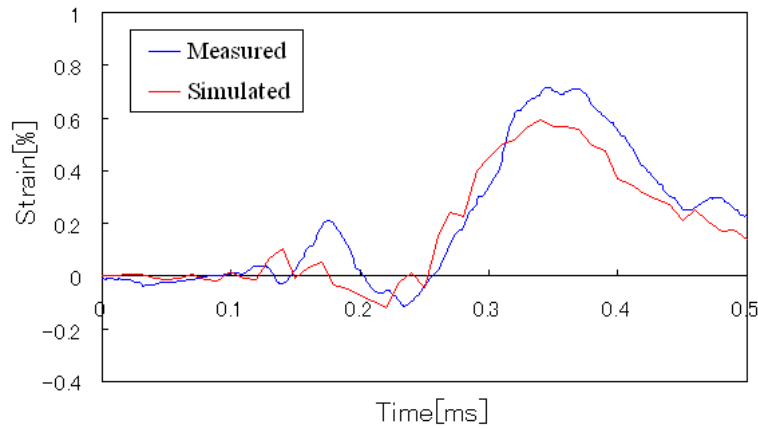
試験片の挙動比較

(T800/2500 V=220.5m/s E=73.2J/mm)



実験と解析でのひずみの比較

(T800/2500 V=137.3m/s E=27.9J/mm)

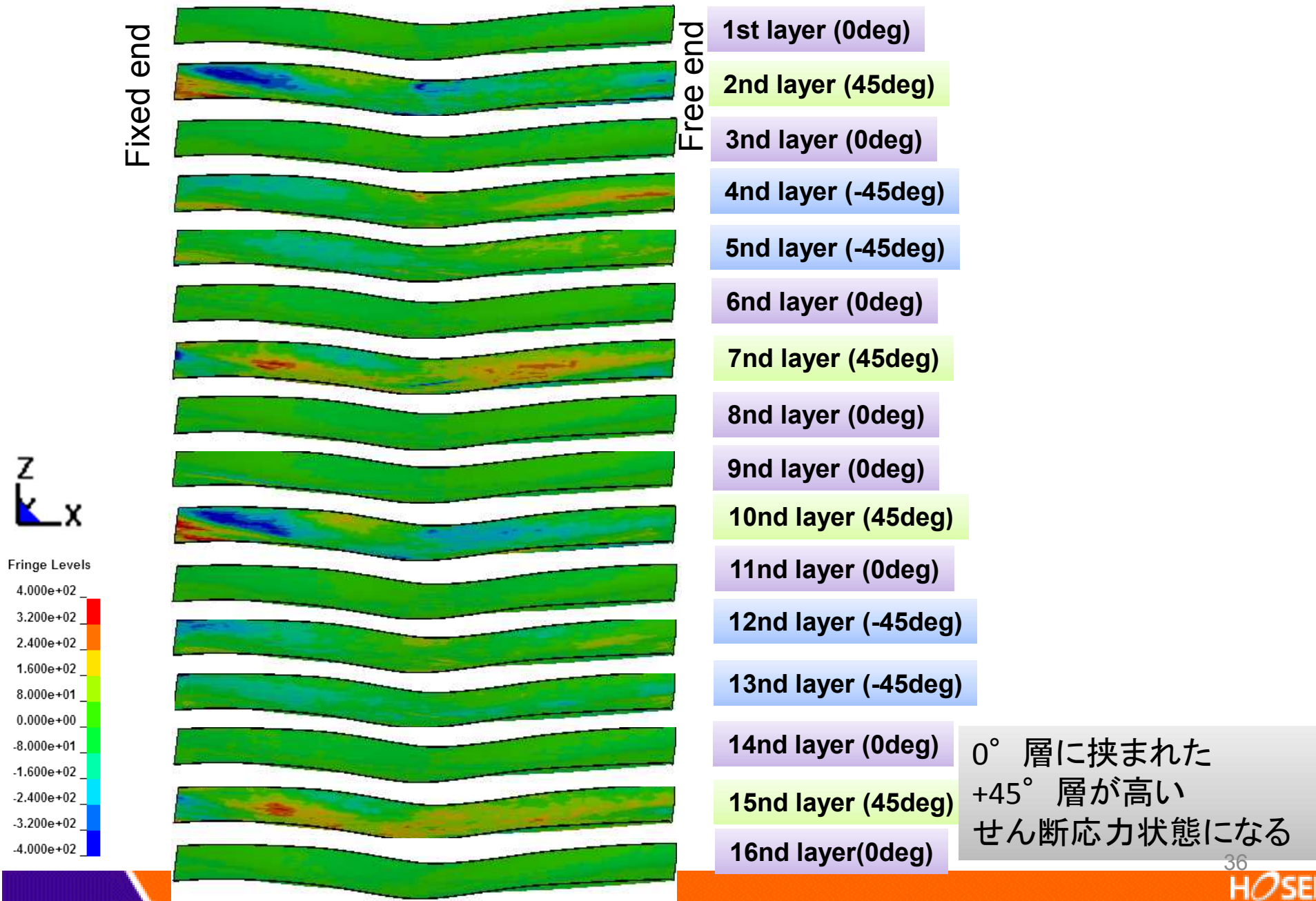


35

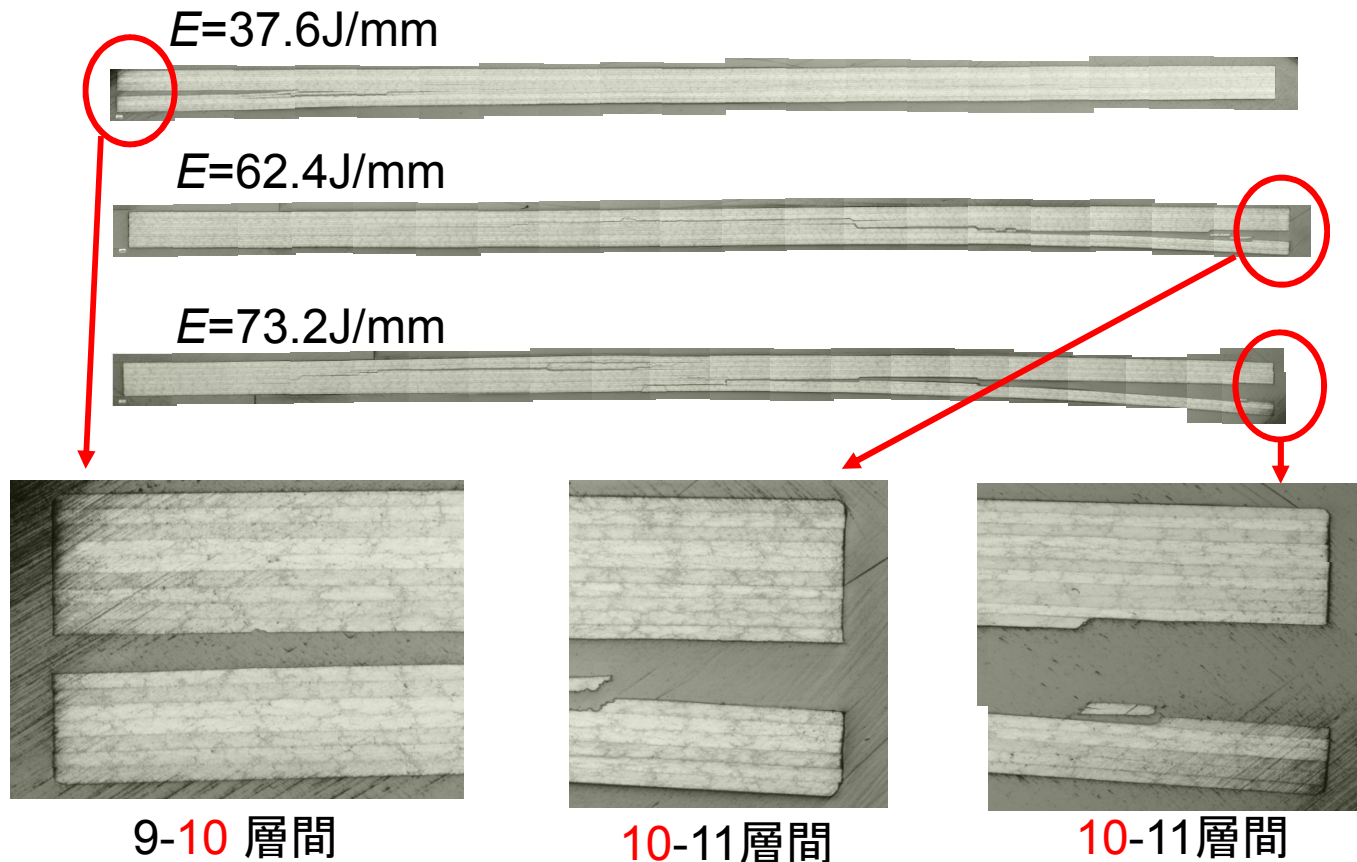
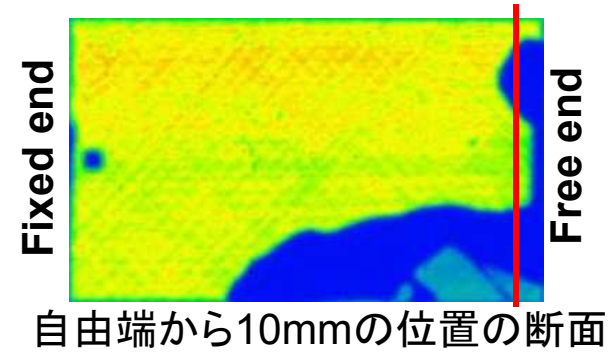
面内せん断応力分布

T800/2500 [(0/45/0/-45)s]s

$V=220.5\text{m/s}$ $E=73.2\text{J/mm}$ 衝突後0.20ms



層間剥離の発生位置 (T800/2500)



実験の層間剥離挙動においても、+45° 層でせん断応力が高まることで、層間剥離が発生したと考えられる

結論

CFRP積層板の軟体球衝突実験を行い、軟体衝突におけるCFRPの耐衝撃性および損傷機構の検討を行った結果、以下のことがわかった

- 垂直衝突実験から、強化繊維は**損傷の進展**に影響を与え、マトリックス樹脂は**損傷を発生させる臨界エネルギー**と**損傷の進展**に影響を与えている
- 斜め衝突実験において、損傷面積率は高衝突角度で最大となり、衝突速度の垂直成分が大きく影響する**脆性的損傷**である
- [(0/45/0/-45)_s]_sのCFRP積層板と軟体球の衝突解析を行った結果、**+45° 層**が高いせん断応力を受け、高せん断応力領域が積層板端部に沿うように進展していた。このことから実験でも**+45° 層**の端部でせん断応力が高まることで、**端部から層間剥離**が進展した

CFRP製硬式野球用 ヘルメットの性能評価

高橋、寒河江、新井、時枝、齊藤：日本機械学会 シンポジウム、スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス2010講演
論文集, pp.1-3(2010)

硬式野球ボールは**硬く**、頭部への死球は**脳震盪**、**頭蓋骨骨折**など**深刻な怪我**をする恐れがある

脳震盪・・・**記憶力や人格に後遺症**を残す可能性がある

安全基準が制定されたことにより、頭蓋骨骨折は見られなくなったが、**脳震盪**を起こす選手は見かけられる

現在使用されているヘルメットの
緩衝性能は十分であるとは言えない

安全に競技を行うためにヘルメットの緩衝性能を向上
させることが重要となっている



シェル材 PC, ABS樹脂

曲げ変形でエネルギーを
吸収し、荷重を分散

ライナー材 発泡ポリスチレン(EPS)

変形と圧壊で衝撃エネルギーを吸収

断面図

適切なシェル材とライナー材を組み合わせることによりエネルギー
吸収を増加、緩衝性能を向上

・研究目的:硬式野球用ヘルメットシェル材へのCFRPの適用

・緩衝性能向上

を目的とした野球用ヘルメットの開発

・軽量化

人頭模型

JIS規格・SG規格

- ・材質：マグネシウム合金製
- ・固有周波数：3000Hz以上
- ・加速度計：重心付近
- ・質量：5kg
- ・傾斜角度：6° 傾斜

ヘルメット

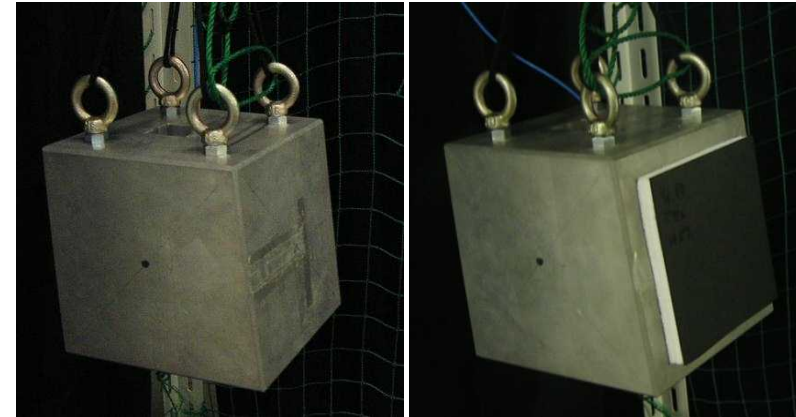


ヘルメットの形状を維持した
状態で材質のみを変更



時間や材料加工等の面で困難

板状供試材

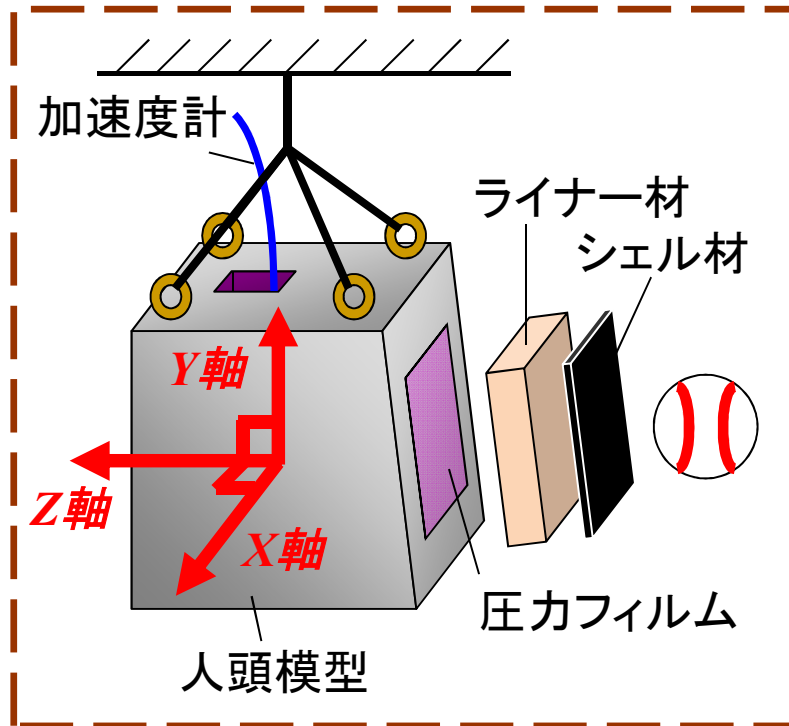


材料の変更が容易



効率良く試験が行える

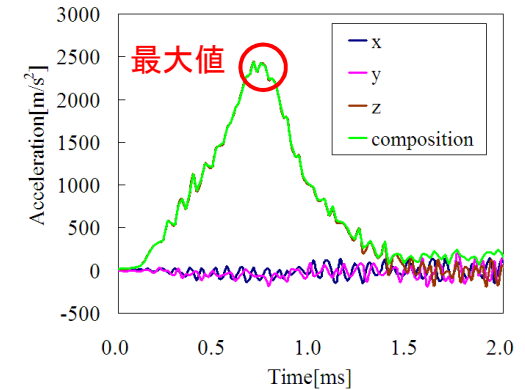
評価方法



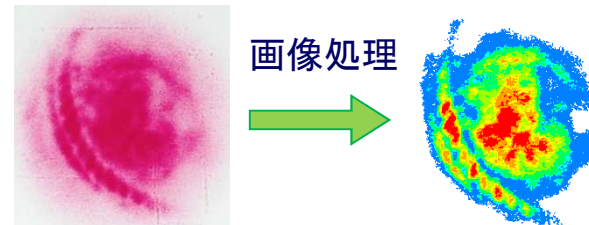
①最大加速度

合成加速度

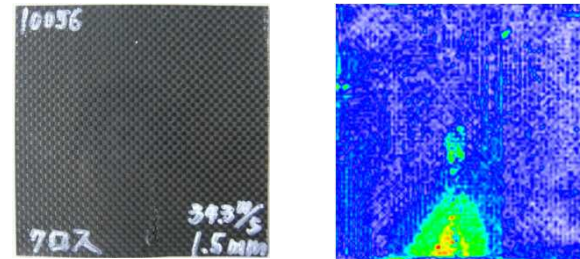
$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$



②圧力分布



③損傷観察



板状シェル材の性能評価

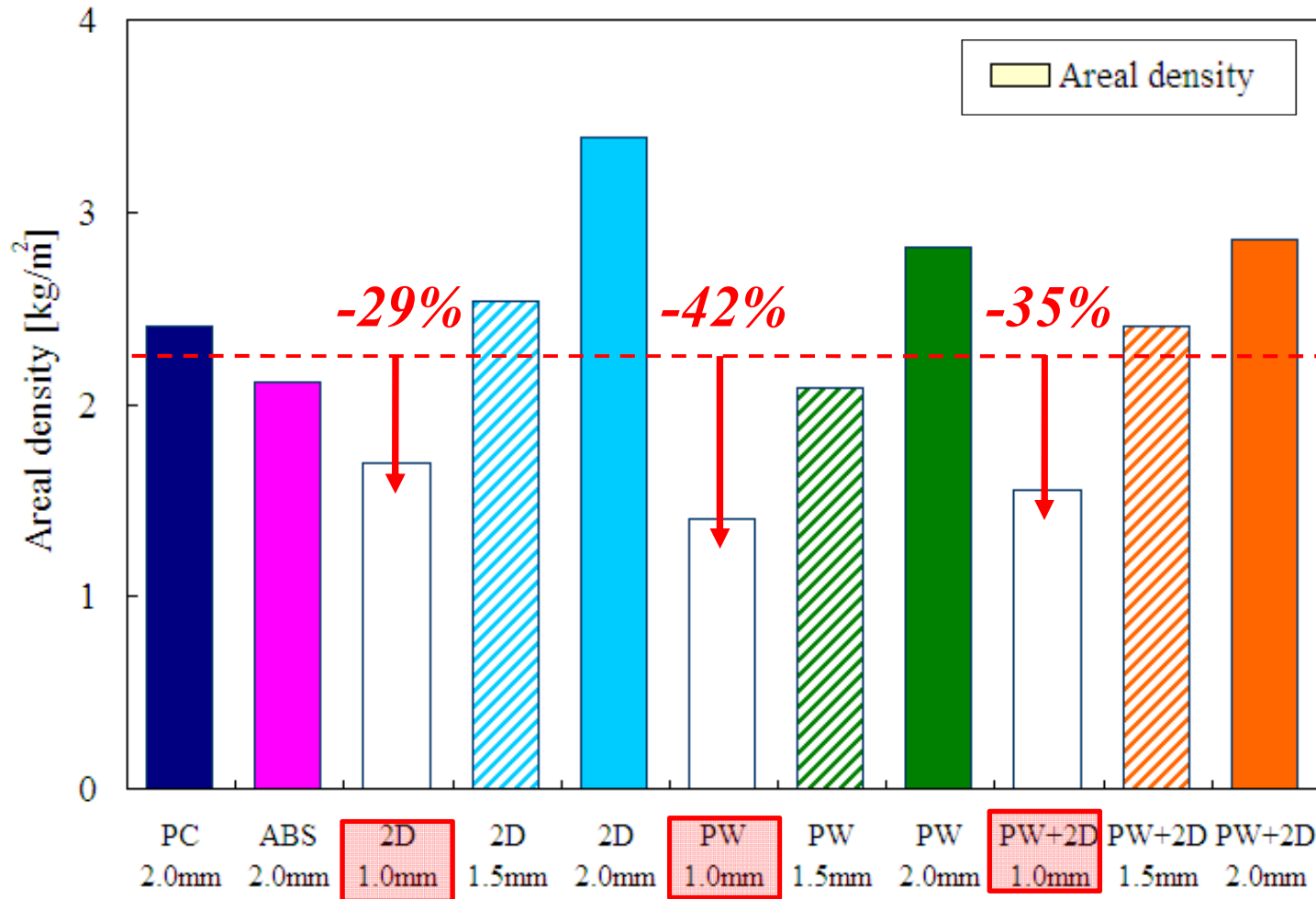
シェル材

- ポリカーボネート(PC)
 - ABS樹脂(ABS)
 - 炭素繊維強化プラスチック(CFRP)
 - ・ 直交異方材[0/90] (2D)
 - ・ 平織(PW)
 - ・ 平織+直交異方材+平織(PW+2D)
- } 板厚: 2.0mm
- } 板厚: 1.0, 1.5, 2.0mm

ライナー材

- 発泡ポリスチレン(EPS)
 - ・発泡倍率: 15倍
 - ・板厚: 11mm

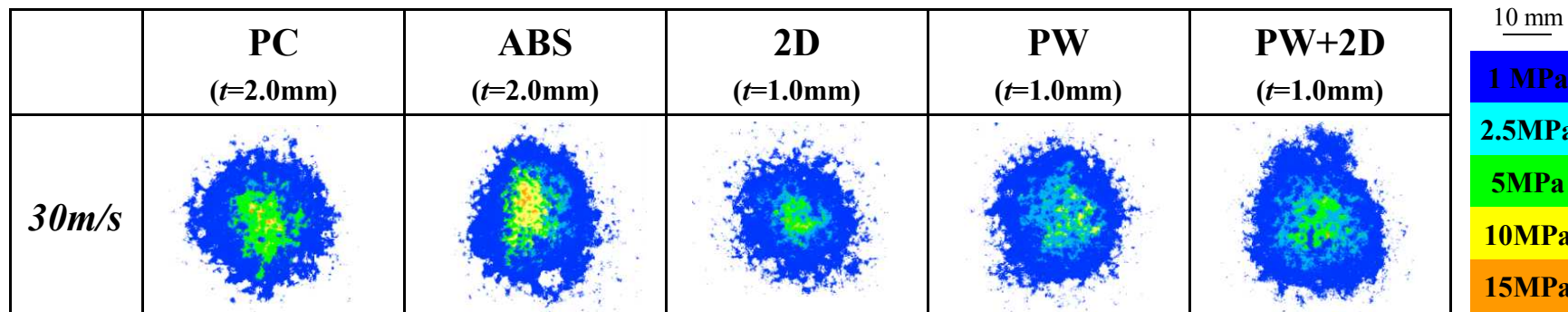
最大加速度と面密度



**板厚1.0mmのCFRPを用いることで
加速度を同等以下に抑え、軽量化することが可能**

圧力分布と損傷観察

＜圧力分布＞



PC, ABS樹脂に比べ、板厚1.0mmのCFRPは、圧力分布が同等もしくは同等以下

＜CFRPシェル材の外部損傷および内部損傷＞

	30m/s			40m/s		
	1.0mm	1.5mm	2.0mm	1.0mm	1.5mm	2.0mm
2D	◎	◎	◎	×	○	◎
PW	×	◎	◎	×	○	×
PW+2D	◎	◎	◎	×	○	◎

◎: no damage
 ○: only internal damage
 ×: external damage & internal damage

PWは損傷が発生しやすく、
2D, PW+2Dは損傷が発生しにくい

板厚1.0mmのCFRP-PW+2Dのシェル材は加速度を同等以下に抑え、
軽量化、衝撃荷重の分散に優れており、損傷が発生しにくい

試作したCFRPヘルメットの性能評価

ヘルメット

- PCヘルメット
- ABS樹脂ヘルメット
- CFRPヘルメット

厚さ: 2.0mm



未塗装のCFRPヘルメット

- ・未塗装のPW+2D
- ・塗装処理を施したPW+2D

厚さ: 1.0mm



塗装処理を施したCFRPヘルメット

JIS規格、SG規格に基づき、曲率を有した人頭模型を使用しヘルメットを被せ、衝突実験を行った



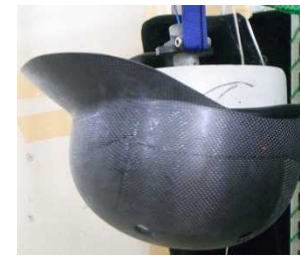
曲面人頭模型

+

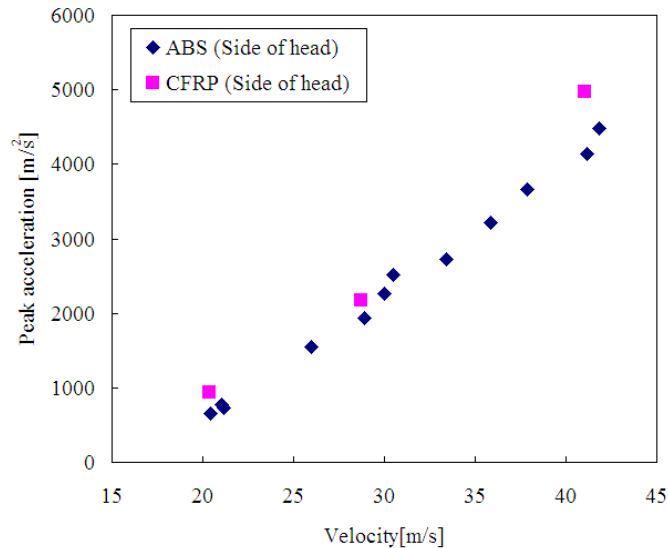


CFRP-PW+2Dヘルメット

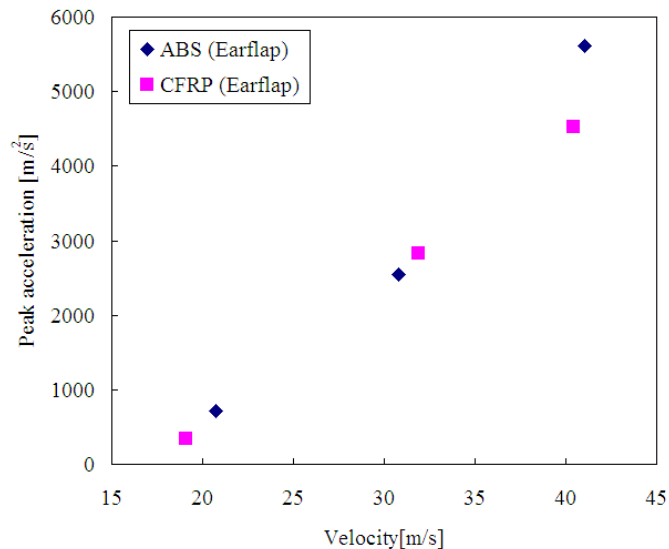
⇒



CFRPヘルメットとABS樹脂ヘルメットの比較



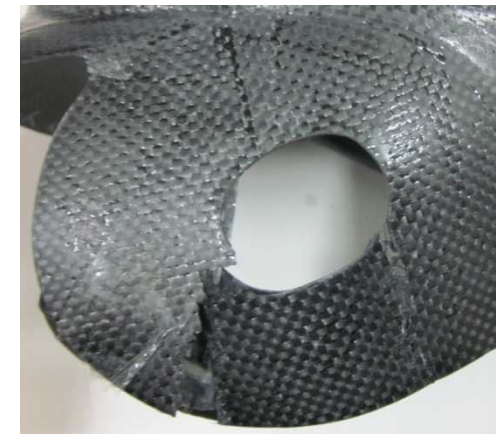
側頭部およびイヤーフラップ部ともに40m/sにおいて多少の相違が見られるものの、最大加速度に大きな差異は見られない



ABS樹脂ヘルメット

CFRPヘルメット

イヤーフラップ部 (v = 40m/s)



クラックが発生

クラックや破断が発生

CFRPヘルメットの性能評価

Material		Thickness [mm]	Total mass [g]	Impact location	Impact velocity [m/s]	Peak acceleration after conversion [m/s ²]	Comparison with PC (Total mass)	Comparison with PC (Acceleration)
PC		2.0	448	Side of head	28.1	2102	-	-
				Earflap	31.8	2867		
ABS			419	Side of head	30.0	2258	-6.4%	+7.4%
			385	Earflap	30.8	2553	-14.1%	-11.0%
CFRP	No paint	1.0	245	Side of head	28.7	2180	-45.3%	+3.7%
	Painting			Earflap	31.9	2822		-1.6%
				292	Side of head	26.1	1585	-34.8%
	Earflap				30.0	2396	-16.4%	



CFRP製バット等に用いられている
塗装接着剤を用いることで塗装部分
の破損は改善されると考えられる

結論

シェル材にCFRPを用いた硬式野球用ヘルメットの緩衝性能を、PC、ABS樹脂シェル材と比較検討した結果、以下のことが分かった

- CFRPの最大加速度は、積層構成の違いや板厚増加による大きな差異は見られないが、PC、ABS樹脂と比較すると微小ではあるが抑制する
- 板厚2.0mmのPC、ABS樹脂と比較すると同板厚のCFRPは、圧力分布が小さくなり、1.0mmで同等もしくはそれ以下となる
- CFRPをシェル材に用いてヘルメットを試作し、PCヘルメットと比較した結果、厚さ1.0mmで加速度が増加することなく、約35%軽量化することが可能である