

衝突破壊の高速撮像実験

松本 恵¹ 島田 玲² 山田 智哉³

1.神戸大学 2.大阪大学 3.名古屋大学

2012/12/11 衝突実験実習@神戸大

はじめに

- 衝突破壊

惑星形成では重要な物理過程

- 衝撃波 (Shock Wave)

媒質中を伝わる圧力の不連続な変化が波として伝わる現象 (ex. 花火の風圧、空振)

– 破壊現象で重要

– 高速現象、素過程の観察はヒトの目では困難

固体媒質中をどのように伝わるか？

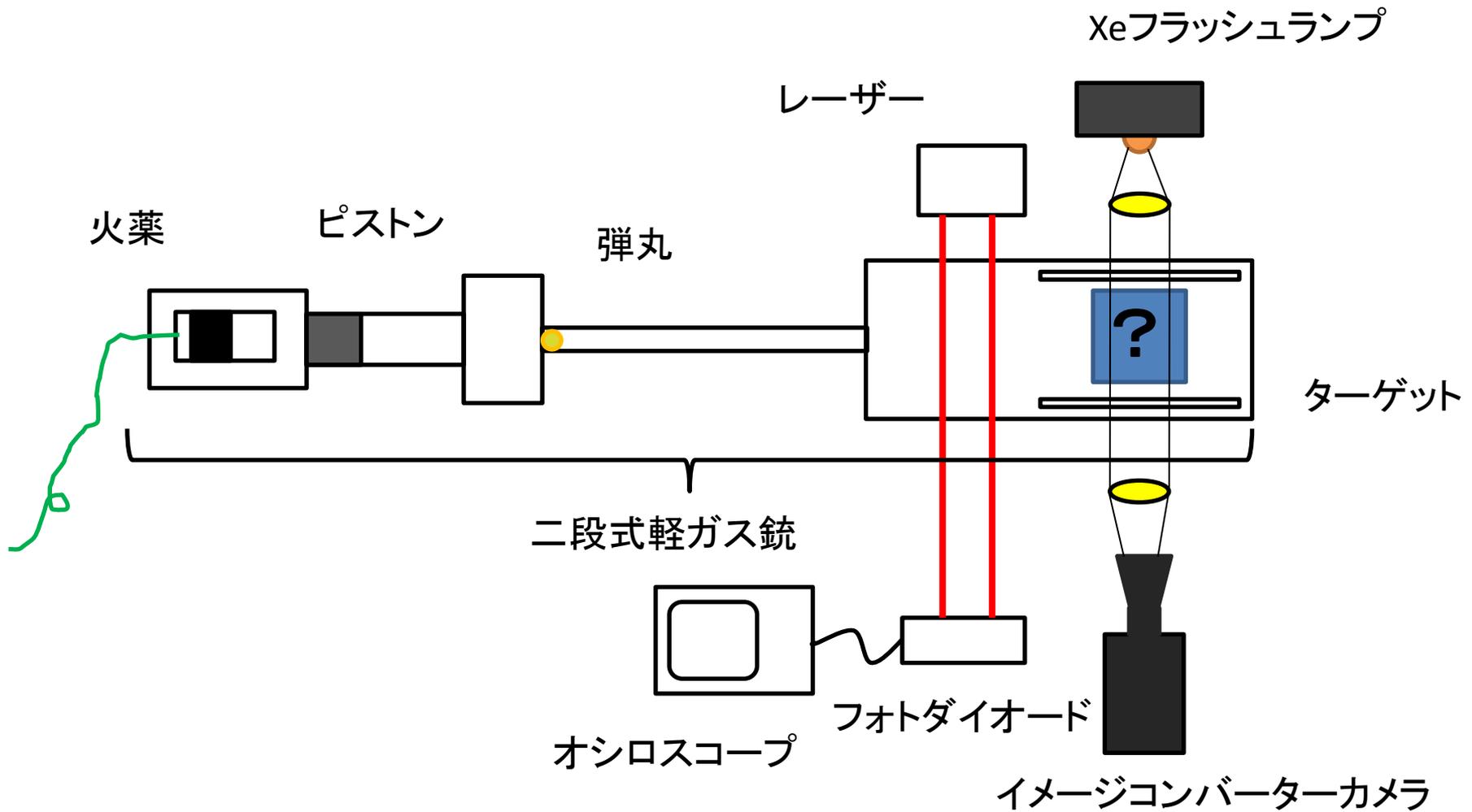
伝播の様子をこの目で見たい！

発表内容

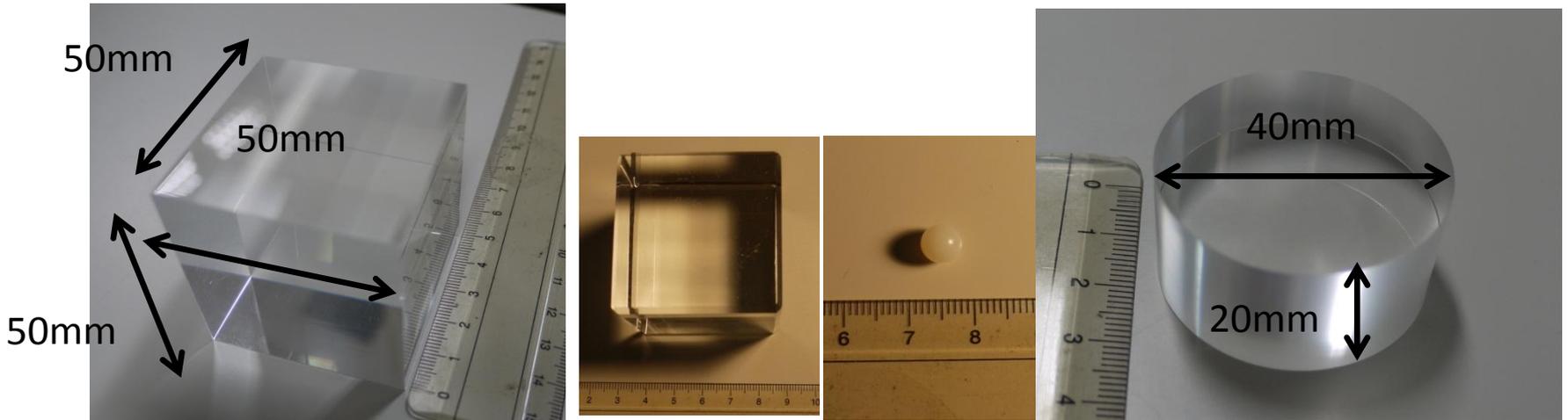
- 実験内容
- 実験手法
 - 弾丸の加速方法、衝撃波撮影システム
- 目的
- 結果 & 考察; 弾丸速度、破片分布、衝突破壊強度
- 結果 & 考察; 弾性波測定、衝撃波速度、衝撃圧力の変化
- まとめ

実験内容

試料に弾丸を衝突させ、衝撃波が伝播する様子を高速カメラで撮影する



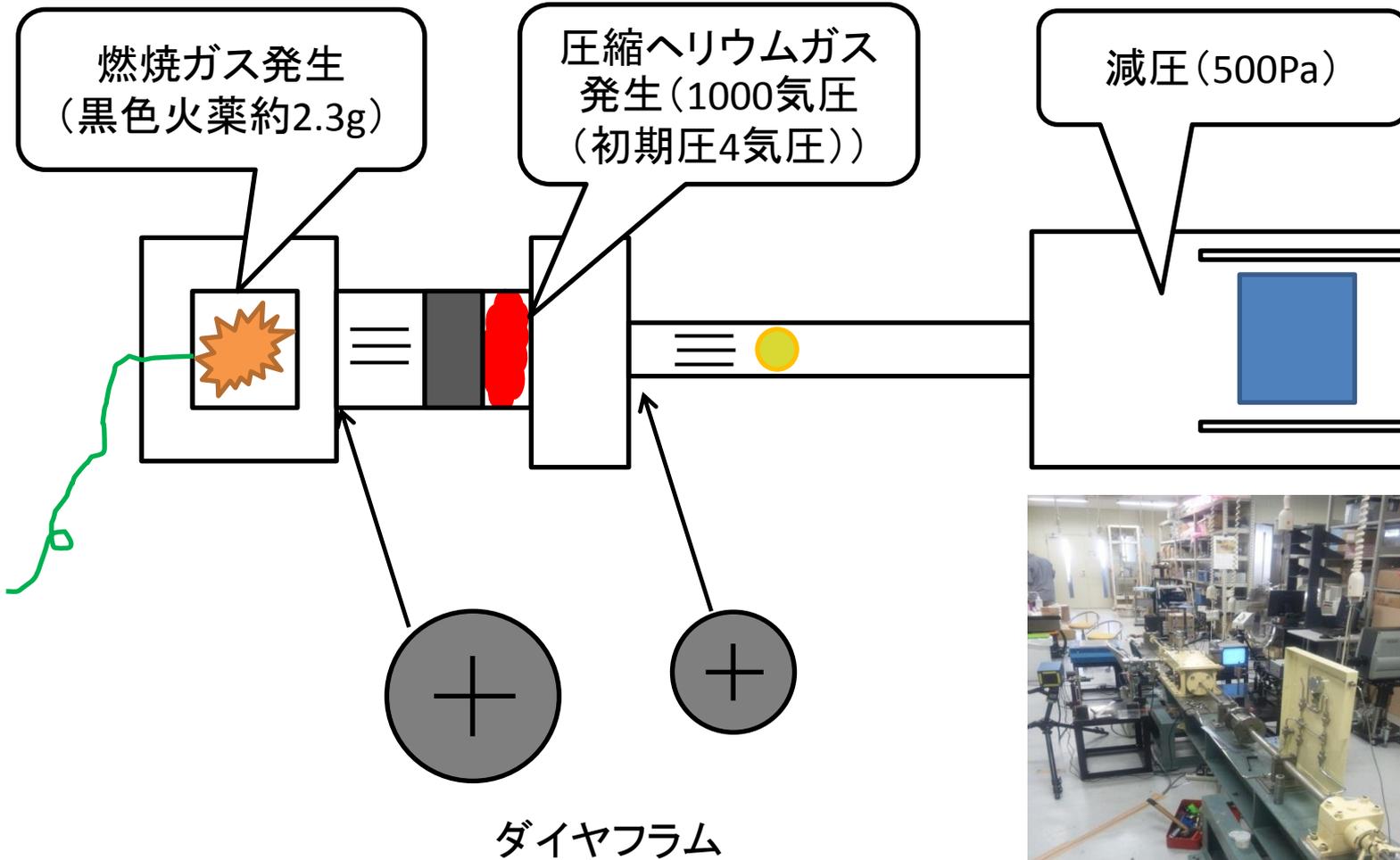
ターゲットと弾丸



ターゲット	サイズ(mm)	ターゲットの総質量(g)	密度(g/cm ³)
アクリルキューブ大	50	146.04	1.17
アクリルキューブ中	30	31.81	1.18
アクリルキューブ小	20	9.36	1.25
アクリル円柱	直径; 40、高さ; 20	29.61	1.19
ガラスキューブ	50	309.08	2.49
ナイロン球(弾丸)	直径; 6.4	0.16	1.19

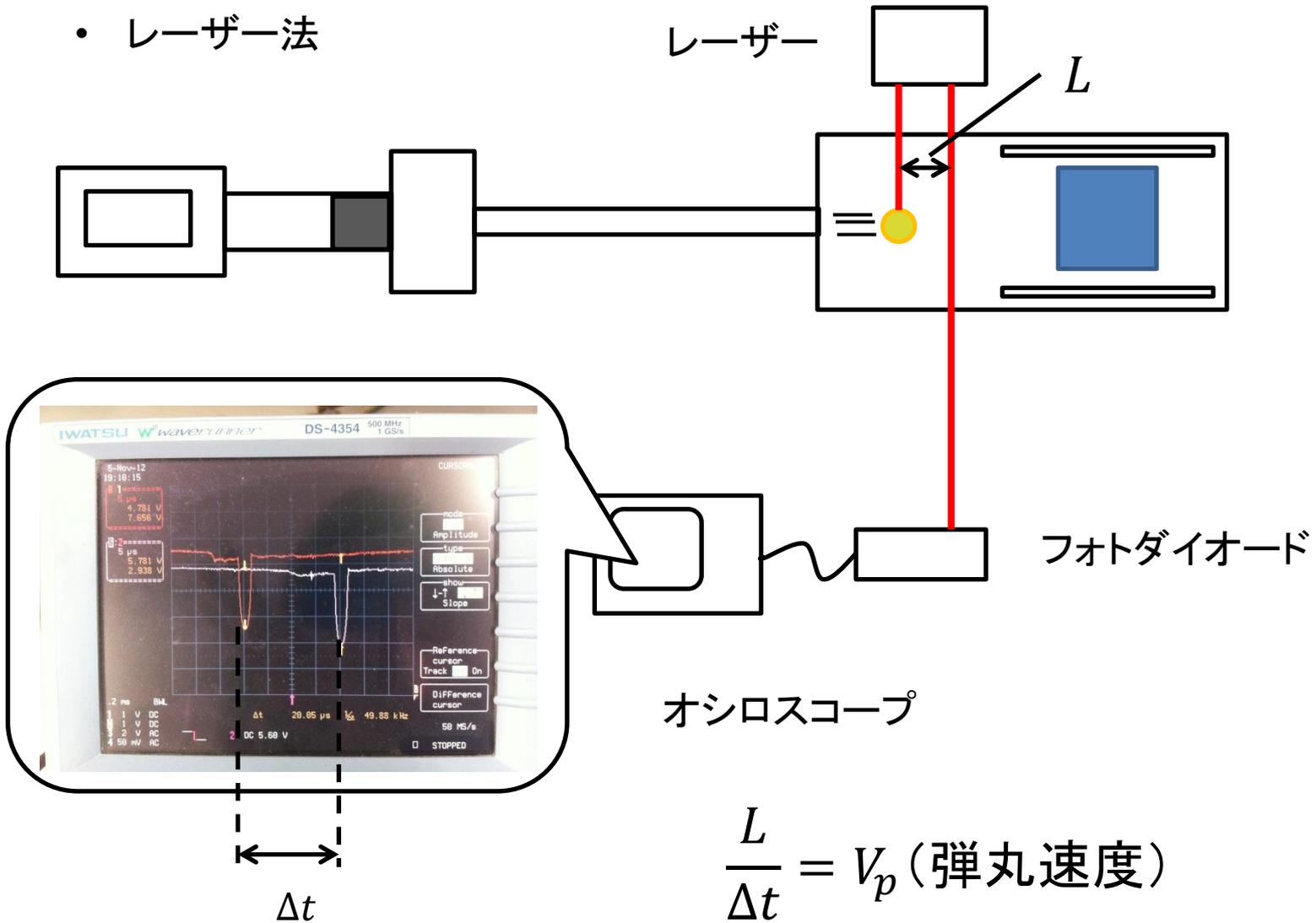
弾丸の加速方法

- 二段式軽ガス銃



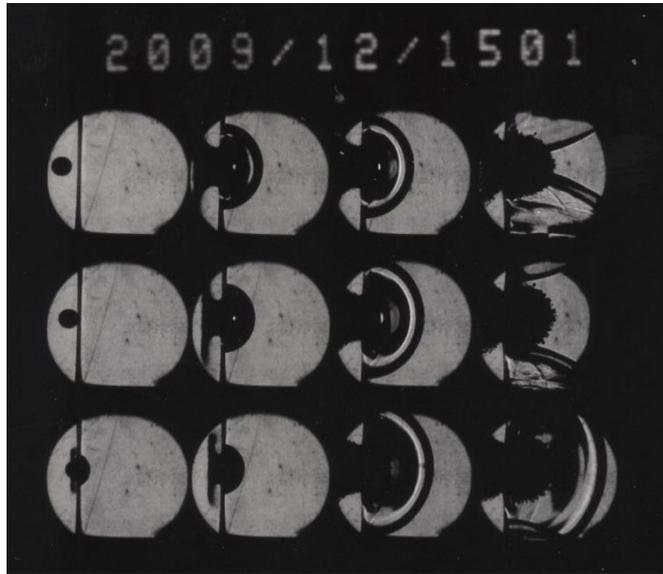
弾丸速度の測定

- レーザー法



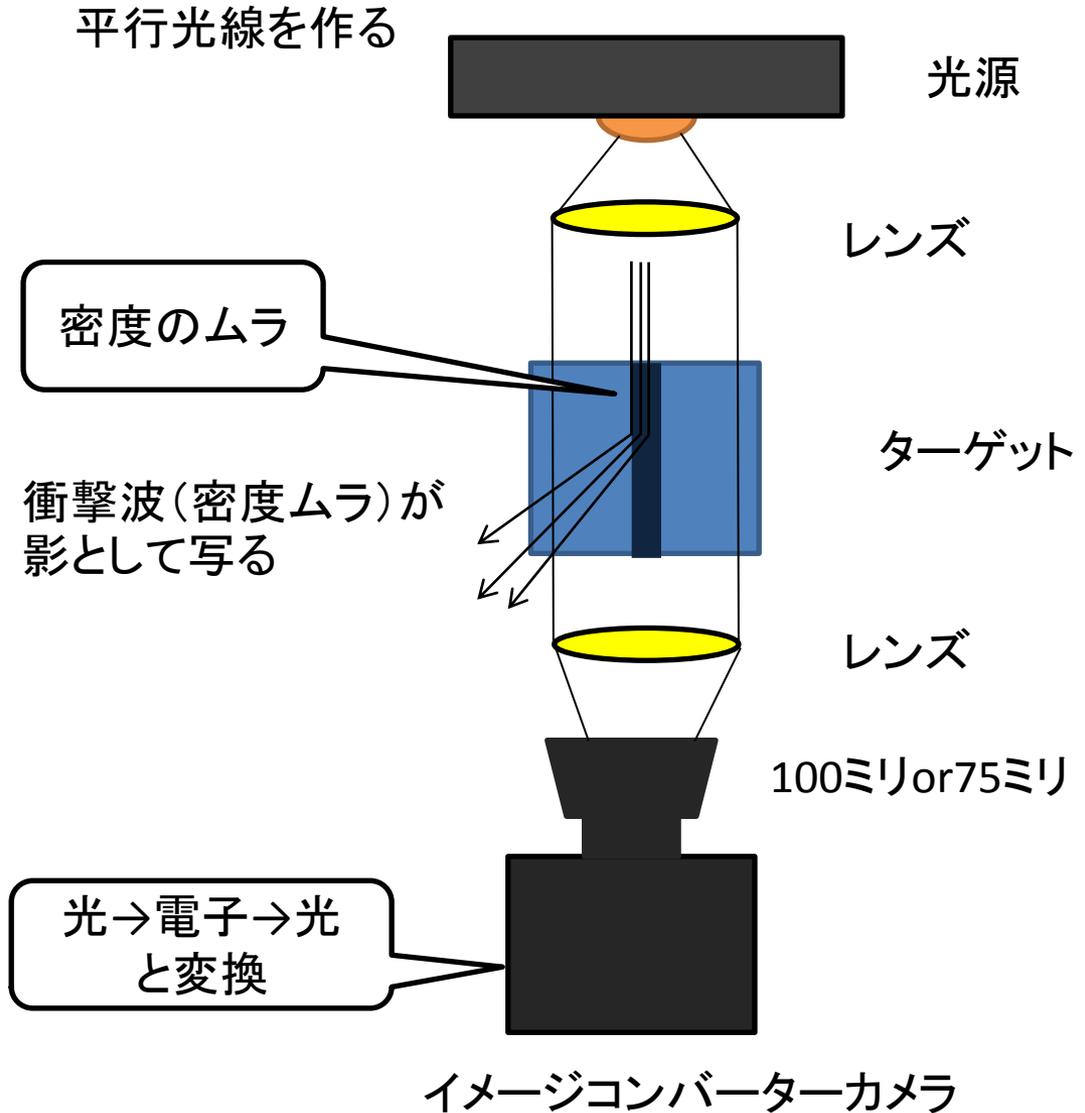
衝撃波撮影システム

平行光線を作る



実際の画像

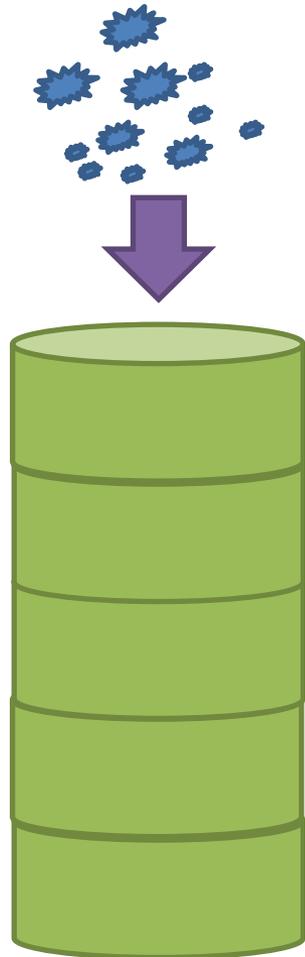
電子を偏向させるタイミングを
変えることで1枚のフィルムに
複数の画像を記録



撮影条件

ターゲット	カメラレンズ(mm)	撮影フレーム数	Delay Time (μ s)
アクリルキューブ大	100	12	30
アクリルキューブ大	100	12	30
アクリルキューブ大	100	12	35
アクリルキューブ中	100	12	33
アクリルキューブ小	100	15	34
アクリル円柱	75	15	33
ガラスキューブ	75	15	32

衝突後の破片試料の取り扱い



4mm以上



質量、個数を計測

4mm～2mm



総質量、10個分の平均質量計測から個数を計測

2mm～500 μ m



総質量を計測、直径400 μ mの球と仮定、個数を計測

500 μ m～300 μ m



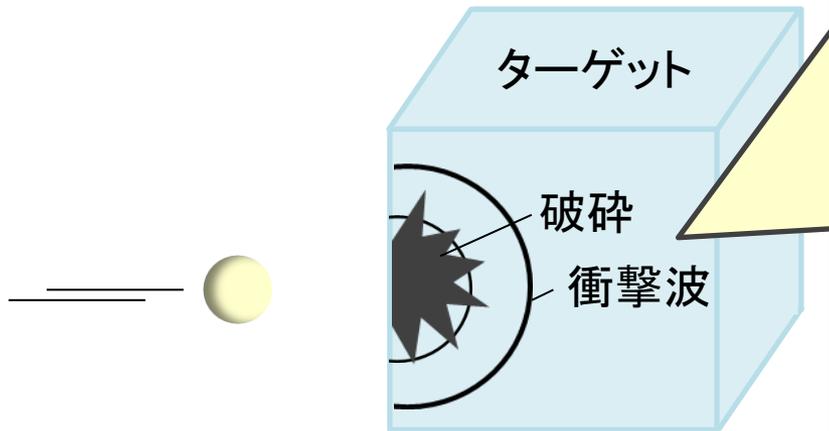
300 μ m以下



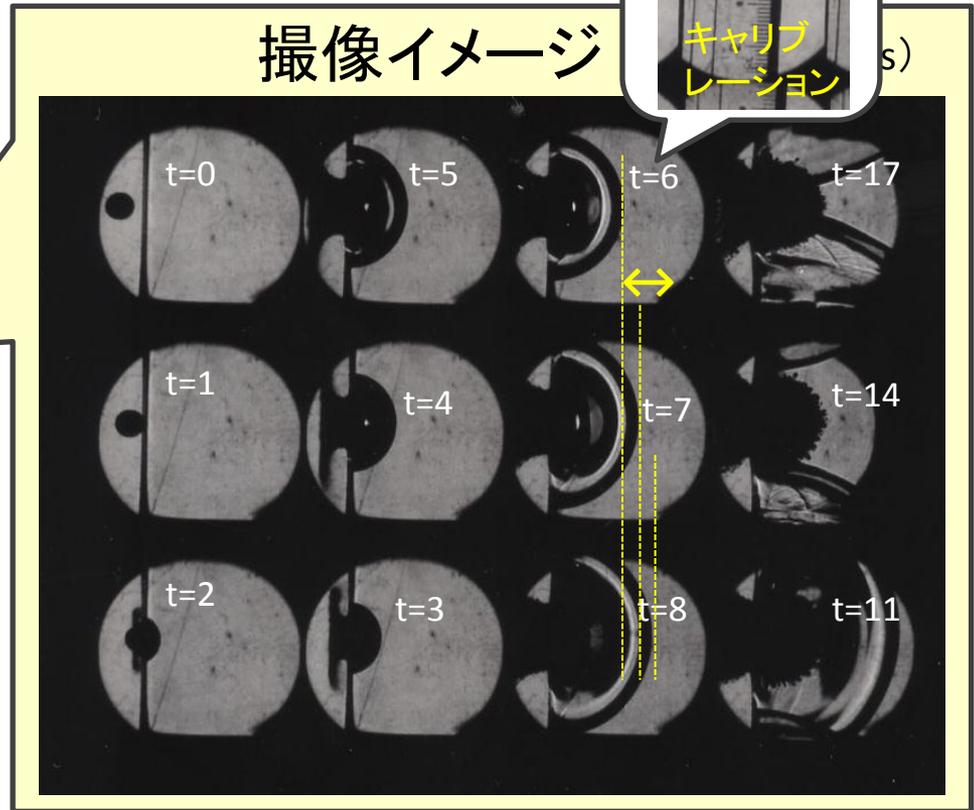
残渣

衝突破壊の高速撮像

- 衝撃波、破砕現象の可視化



衝撃波速度
クラック(破砕)速度
を求める



実験目的

- ターゲットのサイズ、物性、形状、の違いによる破片質量分布を求める
- アクリルとガラスの衝突破壊強度を求める
- 衝突時の画像から衝撃波伝播速度、伝播する圧力の変化を求める

実験

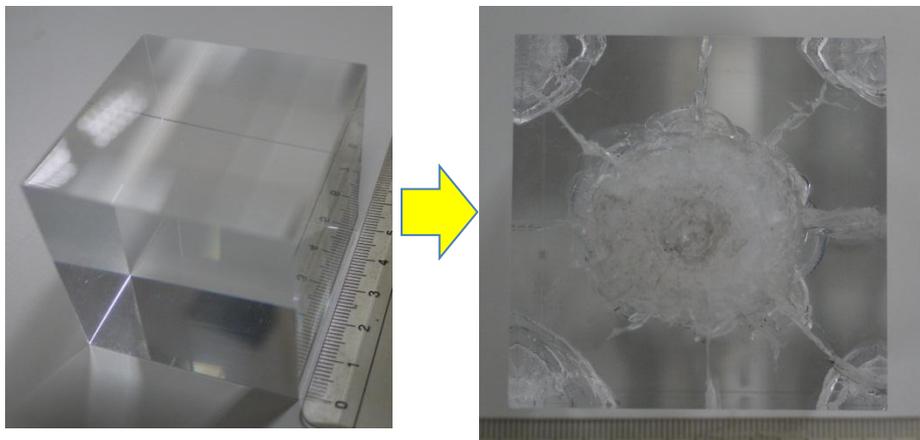
データテーブル

Run No.	ターゲット	ターゲット 質量 M_t (g)	最大破片 質量 M_f (g)	規格化最大 破片質量 M_f/M_t	衝突速 度 (km/s)
20121105-1	アクリル大 (1辺5cm 立方体)	146.04	146.28	1.00	2.59
20121105-2	アクリル大 (1辺5cm 立方体)	146.04	149.00	1.02	2.38
20121106-1	アクリル大 (1辺5cm 立方体)	146.04	144.44	0.99	2.37
20121106-2	アクリル中 (1辺3cm 立方体)	31.81	3.553	0.11	2.64
20121106-3	アクリル小 (1辺2cm 立方体)	9.36	0.50	0.05	2.37
20121106-4	アクリル円柱 (直径4cm 高さ2cm 円柱)	29.61	24.65	0.83	2.43
20121106-5	ガラス (1辺5cm 立方体)	309.08	83.69	0.27	2.48

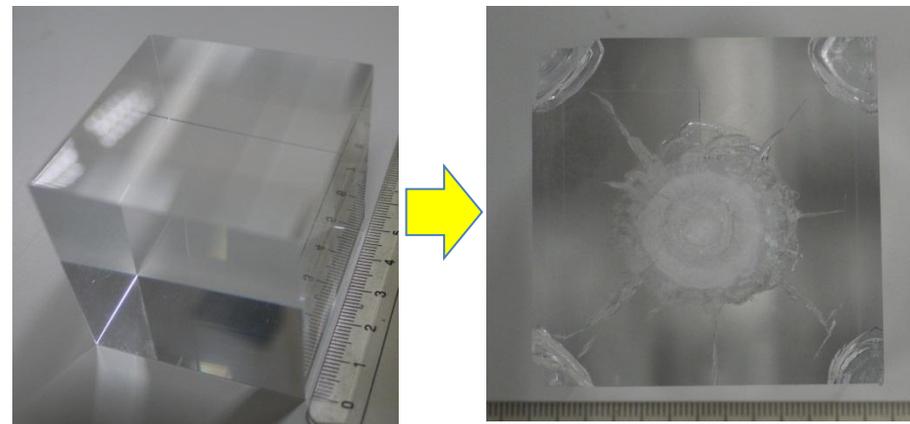
※弾丸は6.35mmナイロン球で統一

ターゲットの破壊の様子

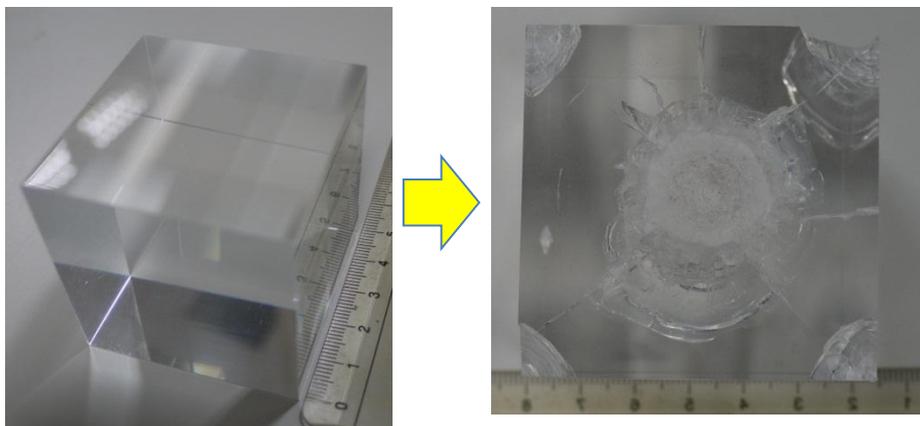
20121105-1(アクリル大:1辺5cm立方体)



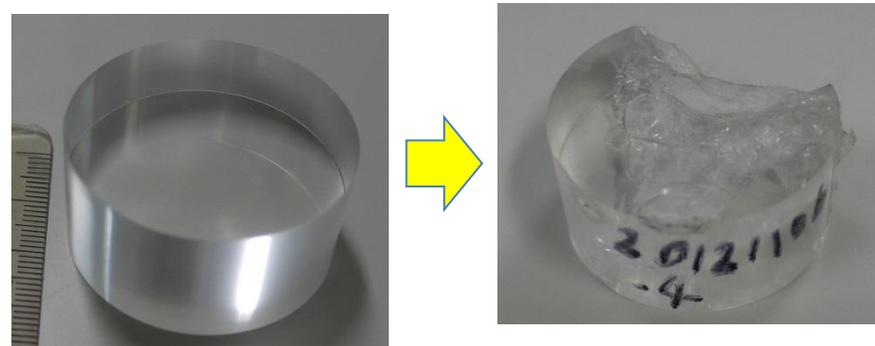
20121106-1(アクリル大:1辺5cm立方体)



20121105-2(アクリル大:1辺5cm立方体)

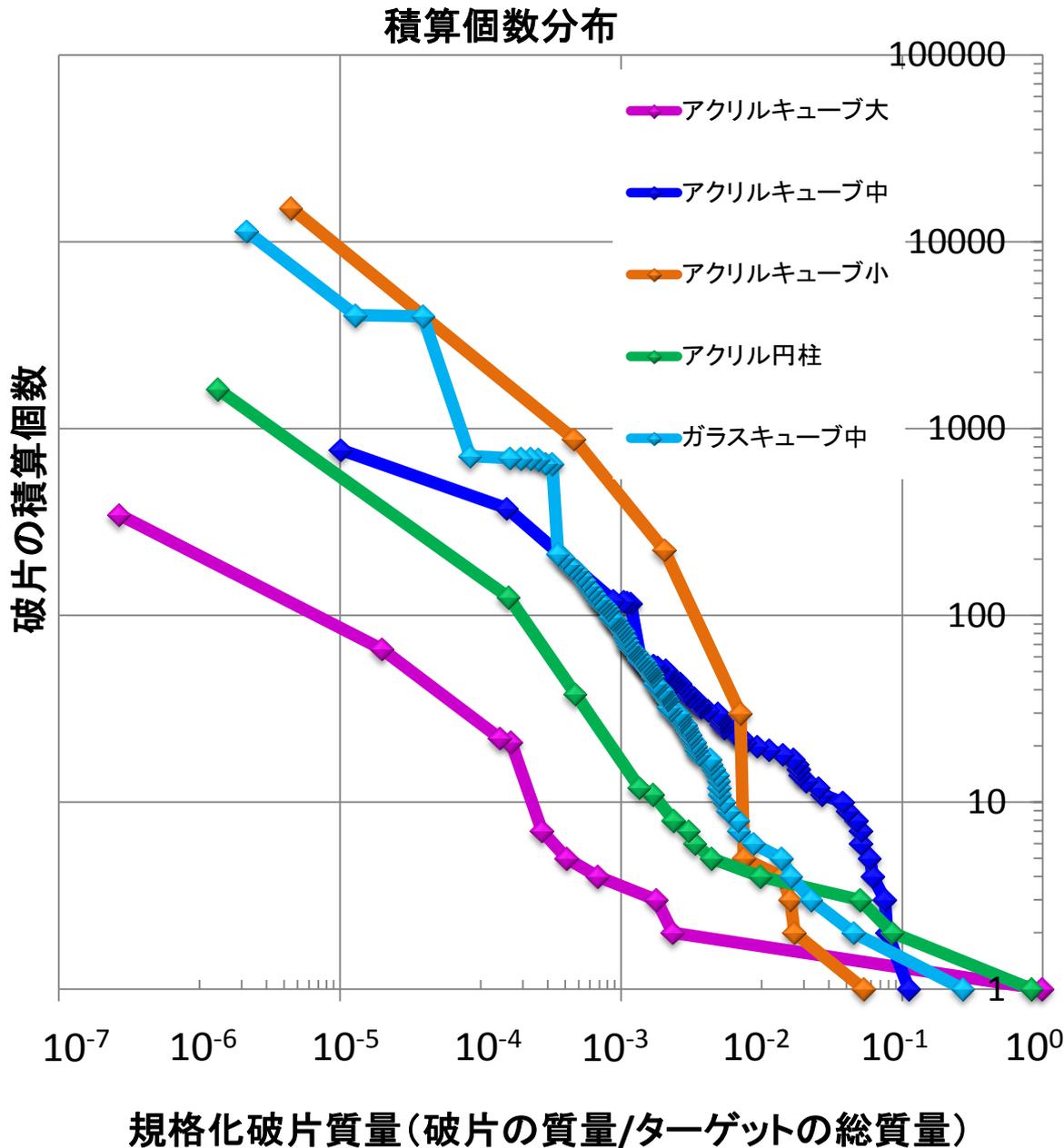


20121106-4(アクリル円柱:直径4cm,高さ2cm)



※20121106-2(アクリル中)、20121106-3(アクリル小)、20121106-5(ガラス立方体)はカタストロフィックに破壊

破片の質量分布



◎アクリルターゲット間での比較

- ・サイズが小さくなると最大破片質量が減少
- ・サイズが小さくなると傾きが増大(細かい破片の占める割合の増大)

⇒ アクリル中、アクリル小はカタストロフィックに破壊

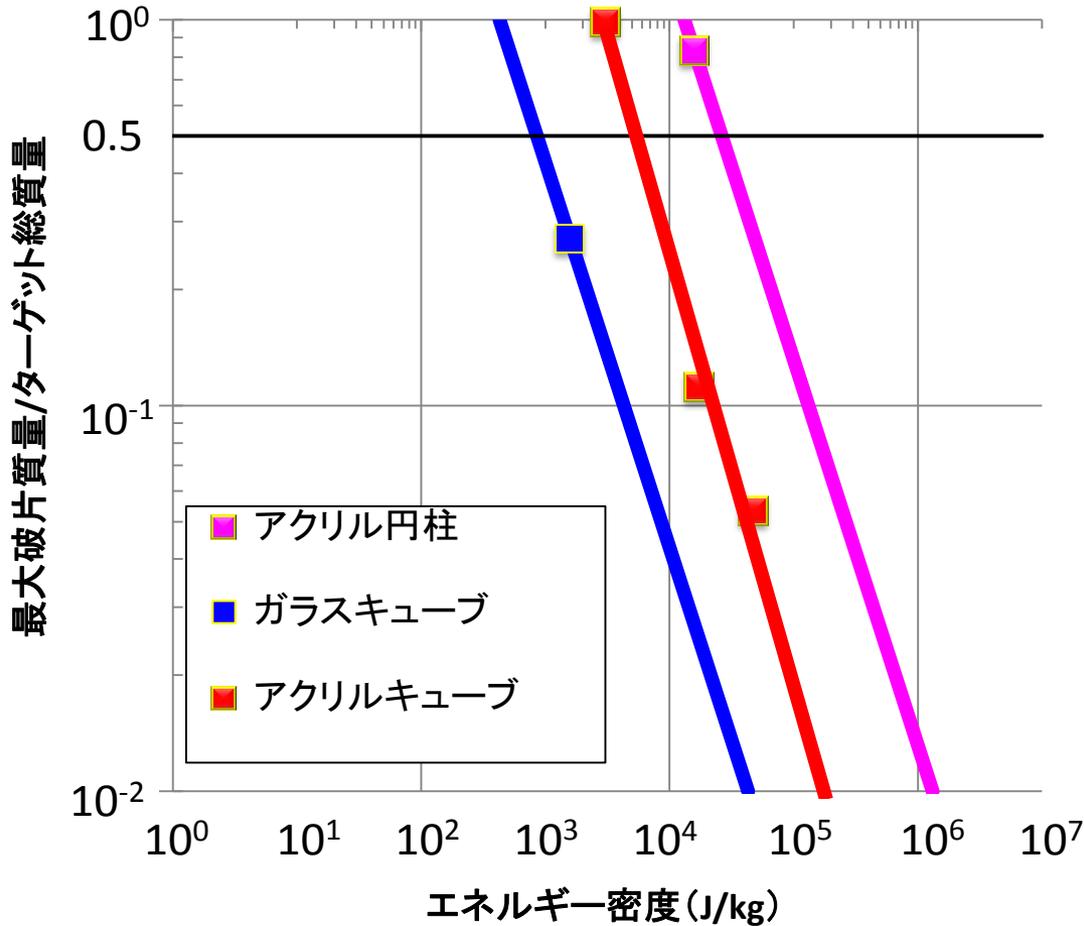
◎アクリル、ガラスターゲット間での比較

- ・ガラスのほうが破片の総量が多く、傾きも急

⇒ ガラスターゲットはカタストロフィックに破壊

ガラス、アクリルの衝突破壊強度

最大破片質量とエネルギー密度の関係



※ガラスキューブ、アクリル円柱は傾き-1を仮定して近似

◎ガラスとアクリル間での比較
・ガラスのほうが強度が小さい

◎アクリルターゲット間での形状の効果
・アクリルキューブは傾き-1の直線に乗るが、円柱は乗らない

⇒円柱のほうが強度が大きい

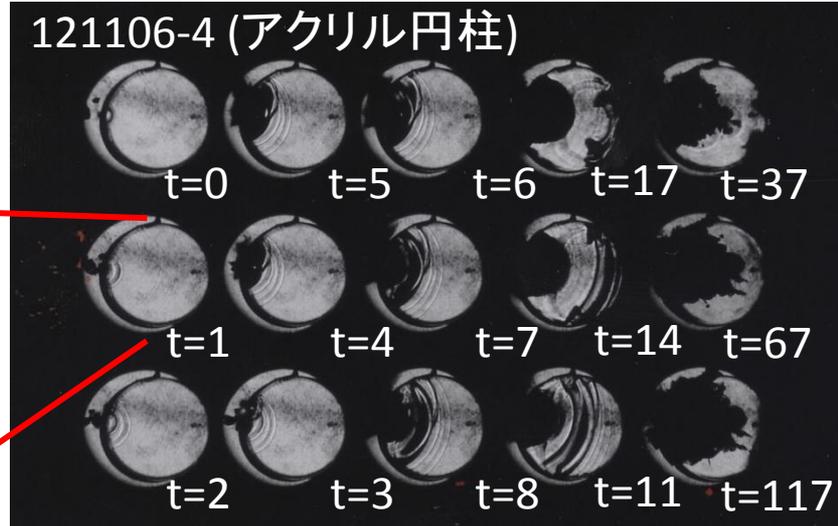
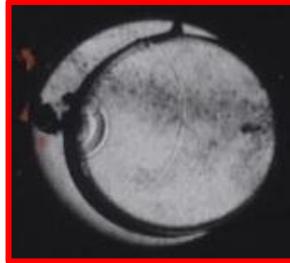
なぜ？

ガラス、アクリルの衝突破壊強度

なぜアクリル円柱はアクリルキューブに比べて強度が大きいのか？

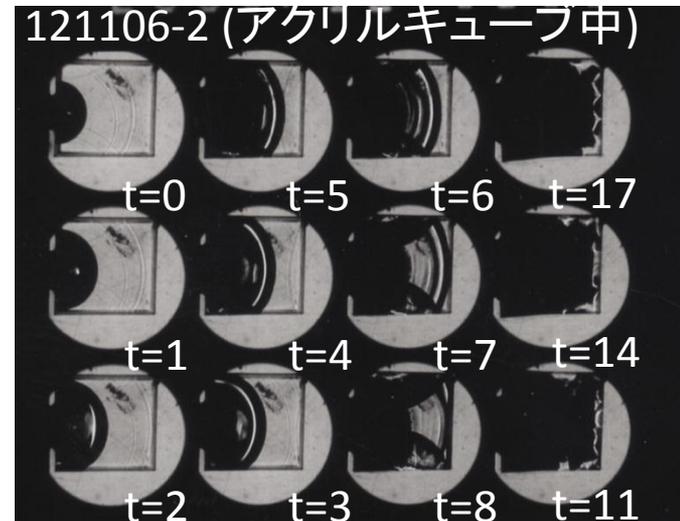
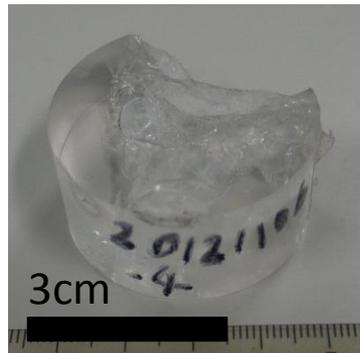
1. 実験時の弾丸の破損の効果

- ・実験時に弾丸が分裂して衝突
⇒実際のエネルギー密度はより大きい可能性



2. 形状の効果

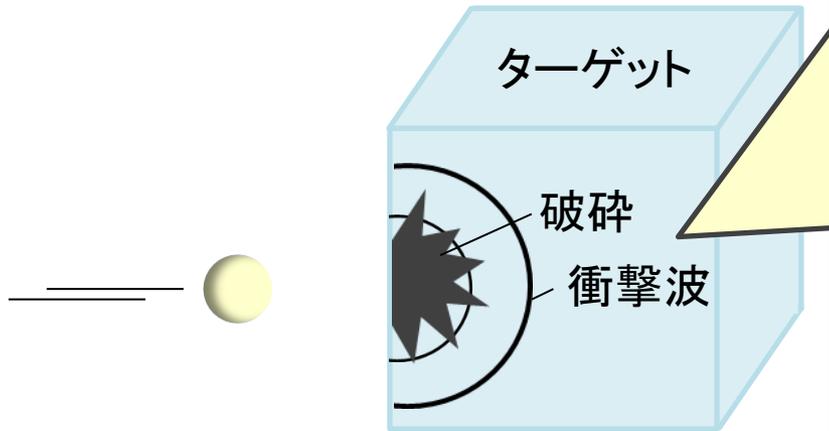
- ・キューブ: 頂点に衝撃波の集中
⇒破壊されやすい部分がある
- ・円柱: 衝撃波の集中する点がない
⇒キューブに比べて破壊されにくい



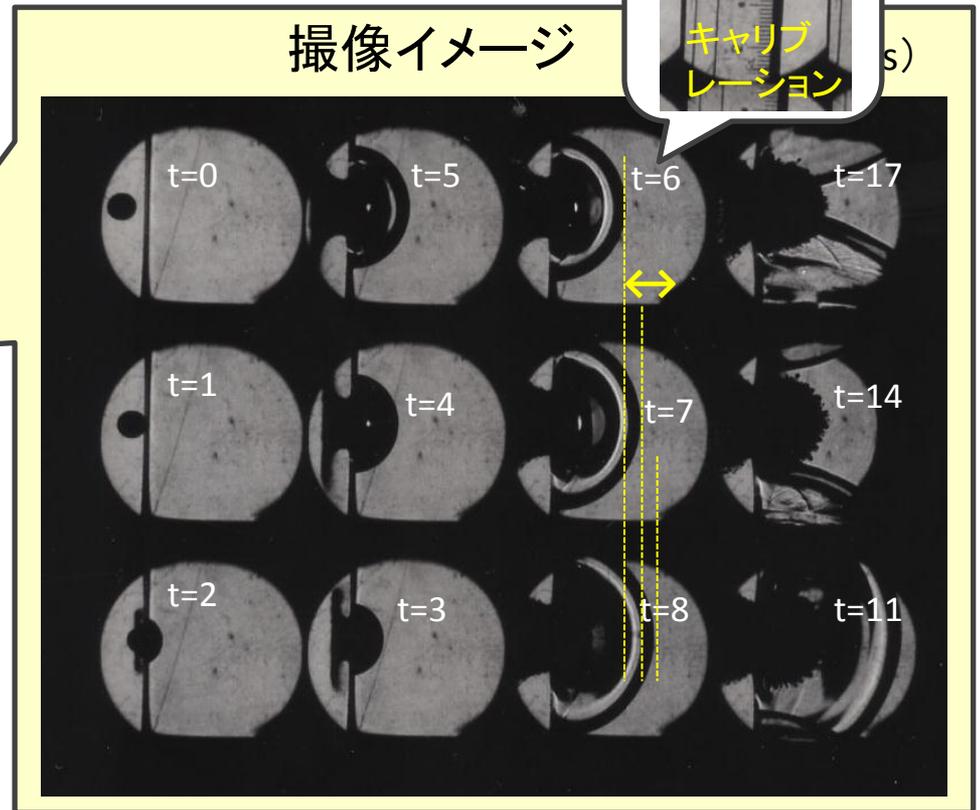
時間単位: μs

衝突破壊の高速撮像

- 衝撃波、破砕現象の可視化



衝撃波速度
クラック(破砕)速度
を求める



衝突破壊の高速撮像

- 実験条件

弾丸: **ナイロン球** (衝突速度: 2.36-2.64 km/s)

ターゲット: **アクリルキューブ・円柱**

大: 50 × 50 × 50 mm

中: 30 × 30 × 30 mm

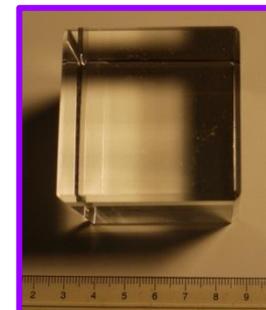
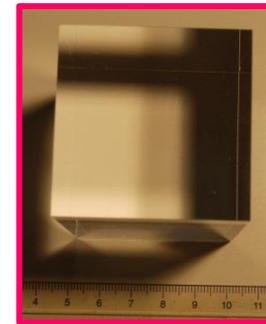
小: 20 × 20 × 20 mm

円柱: 直径40 mm, 高さ20 mm

ガラスキューブ

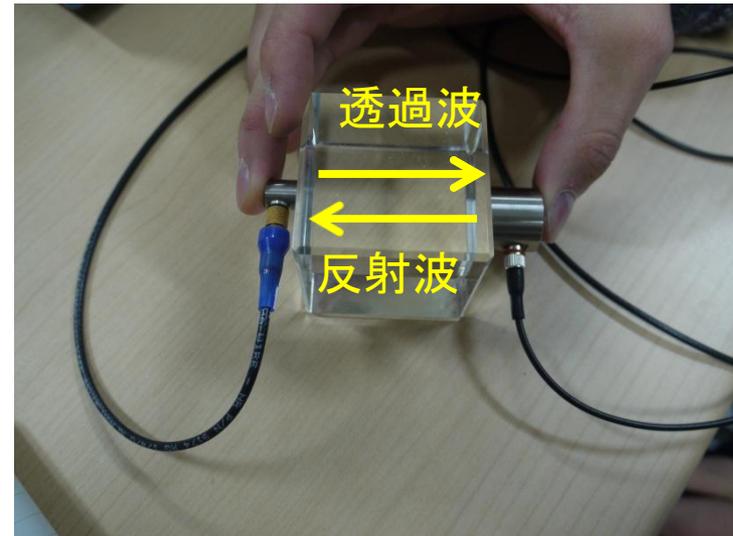
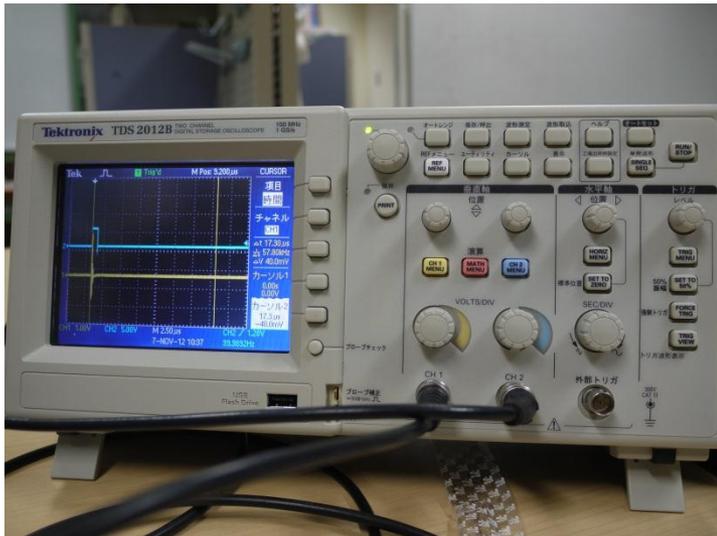
大: 50 × 50 × 50 mm

撮像間隔: 1, 3, 20, 30, 50, 100 μ s
(各フレームごとに設定)



ターゲット中のP波速度とS波速度の測定

- 透過法・反射法

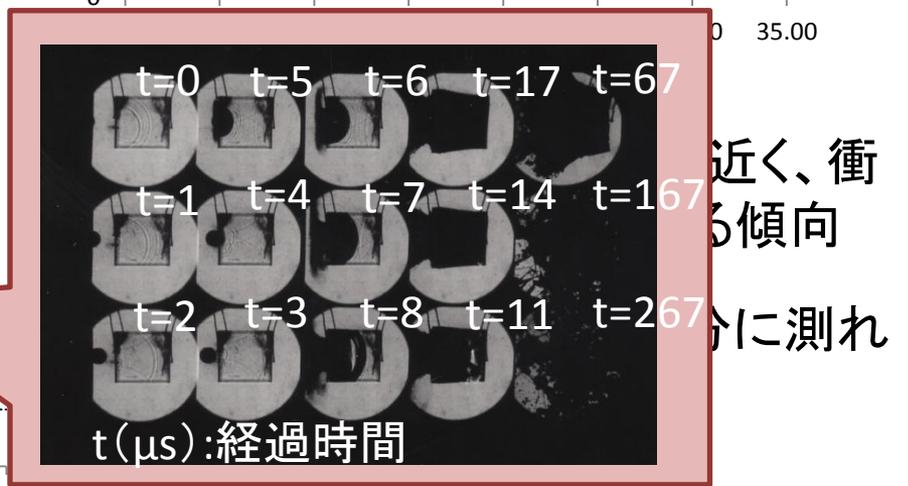
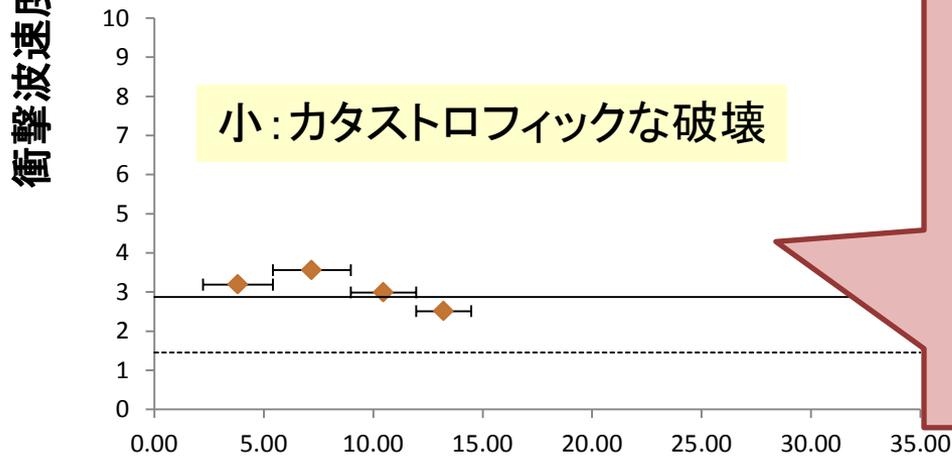
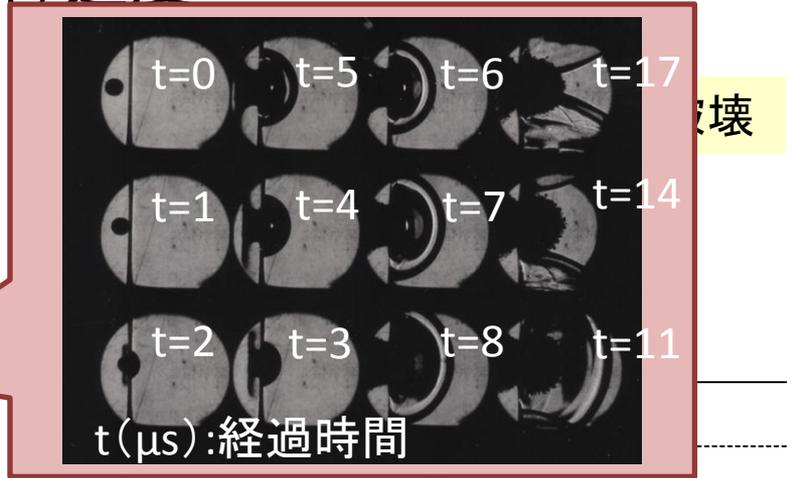
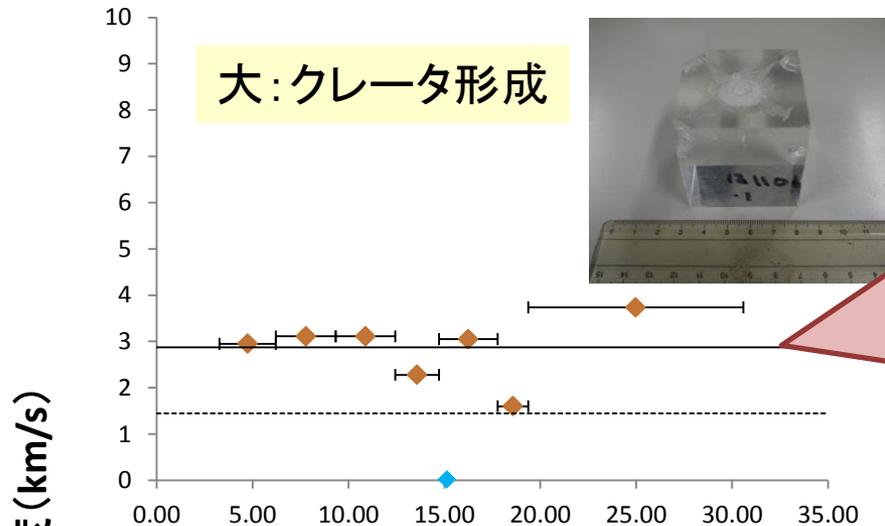


P波・S波が伝播する時間を測定し、P波・S波速度を求める

	アクリル	ガラス
P波 (km/s) :	2.87	5.80
S波 (km/s) :	1.45	3.34

アクリルキューブの衝突破壊

衝突破壊速度とクラック(破砕)速度



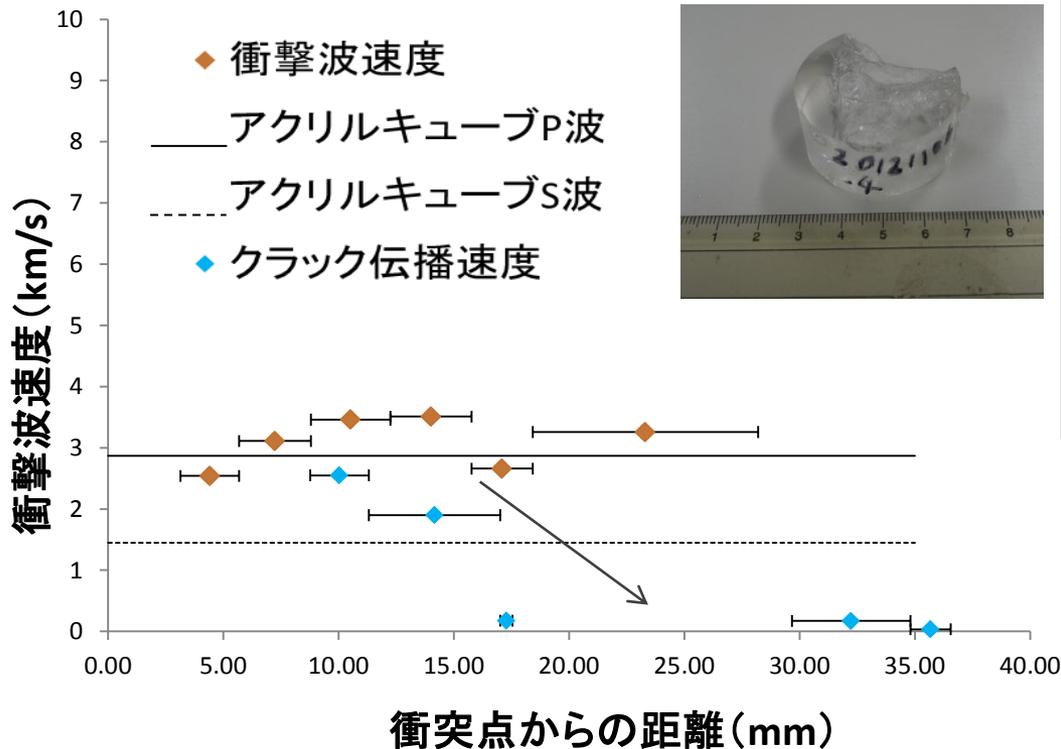
破壊

近く、衝突する傾向
分に測れ

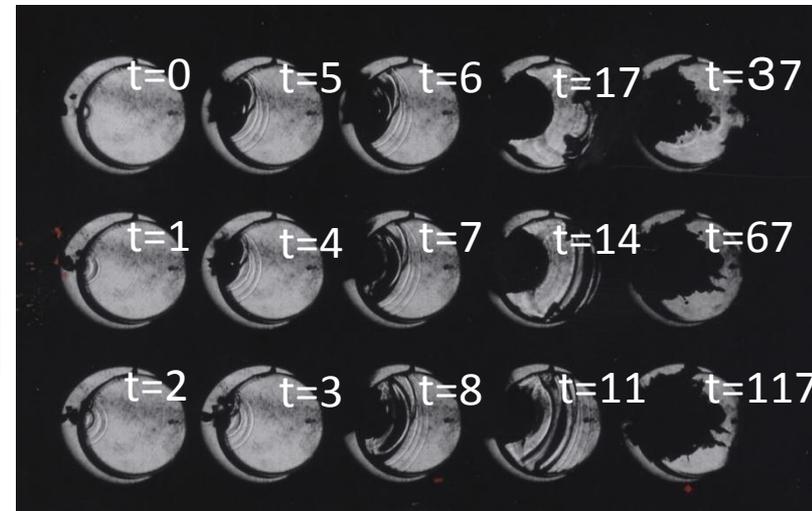
アクリル円柱の衝突破壊

- 衝突波速度とクラック(破碎)速度

円柱: クレータ形成



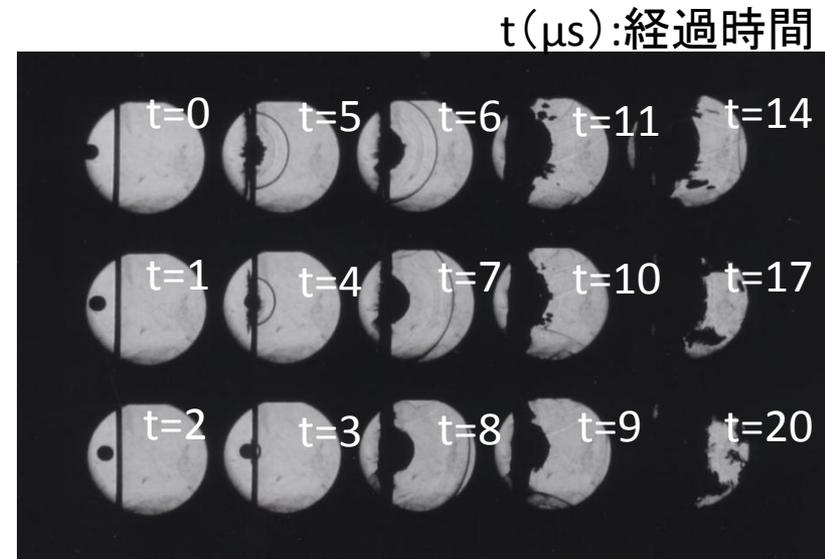
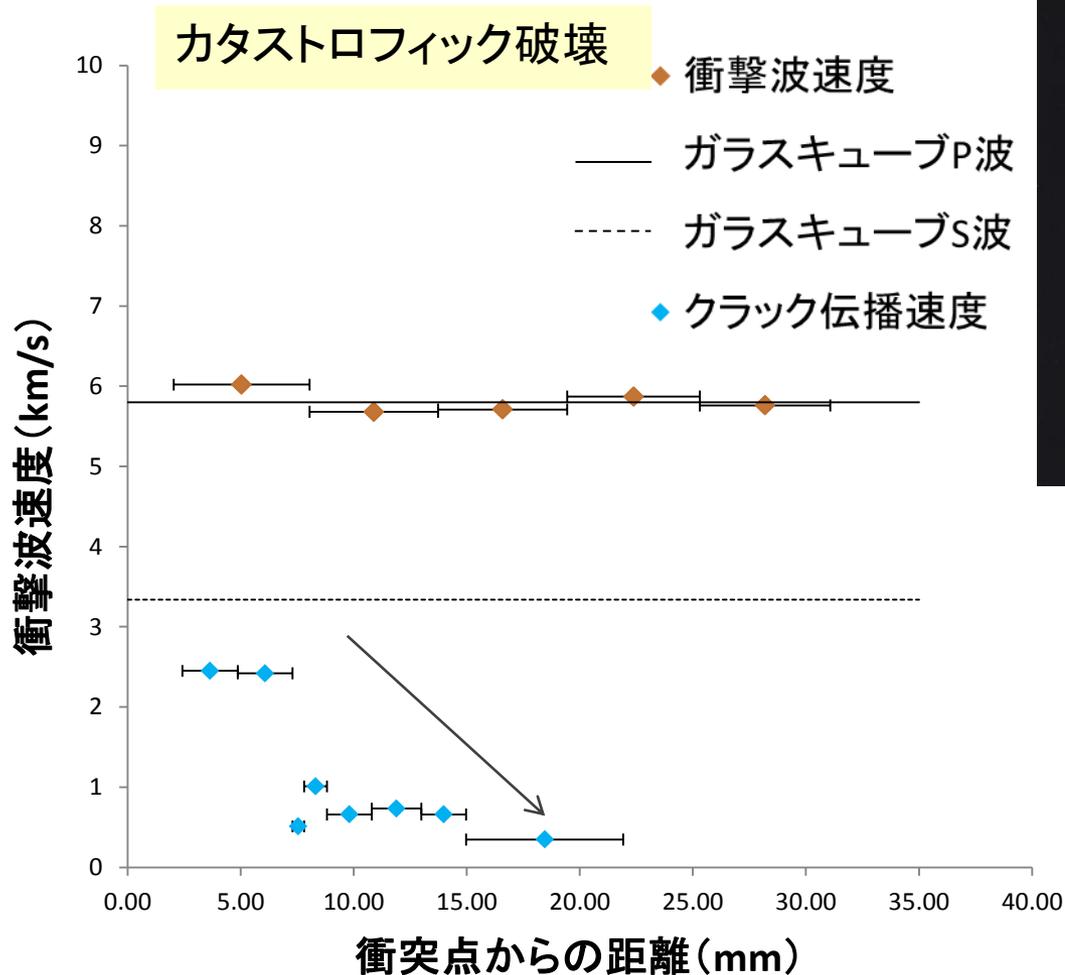
t(μs): 経過時間



- 衝撃波速度は、P波速度付近にプロットされる
- クラック(破碎)速度は減少

ガラスキューブの衝突破壊

衝撃波速度とクラック(破碎)速度



- ・衝撃波速度は、P波速度付近にプロットされる
- ・クラック(破碎)速度は急激に下がる

ターゲット内の衝撃圧力の推定

- インピーダンスマッチング法による衝撃圧力の導出

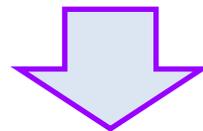
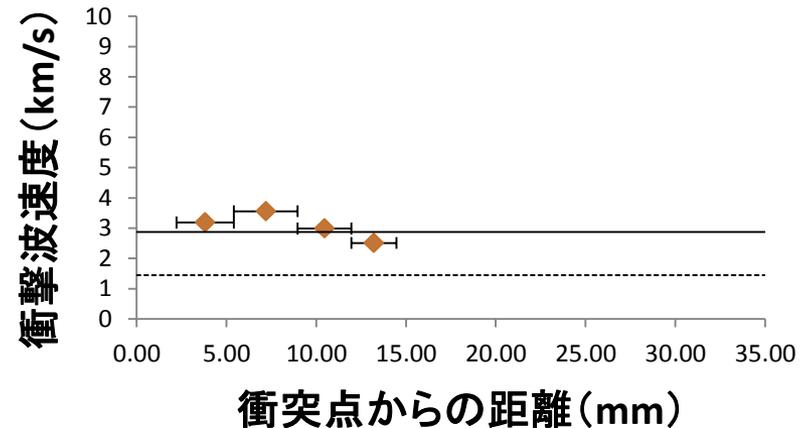
$$P = \frac{\rho U(U - C)}{S}$$

P:圧力

ρ :密度

U:衝撃波速度

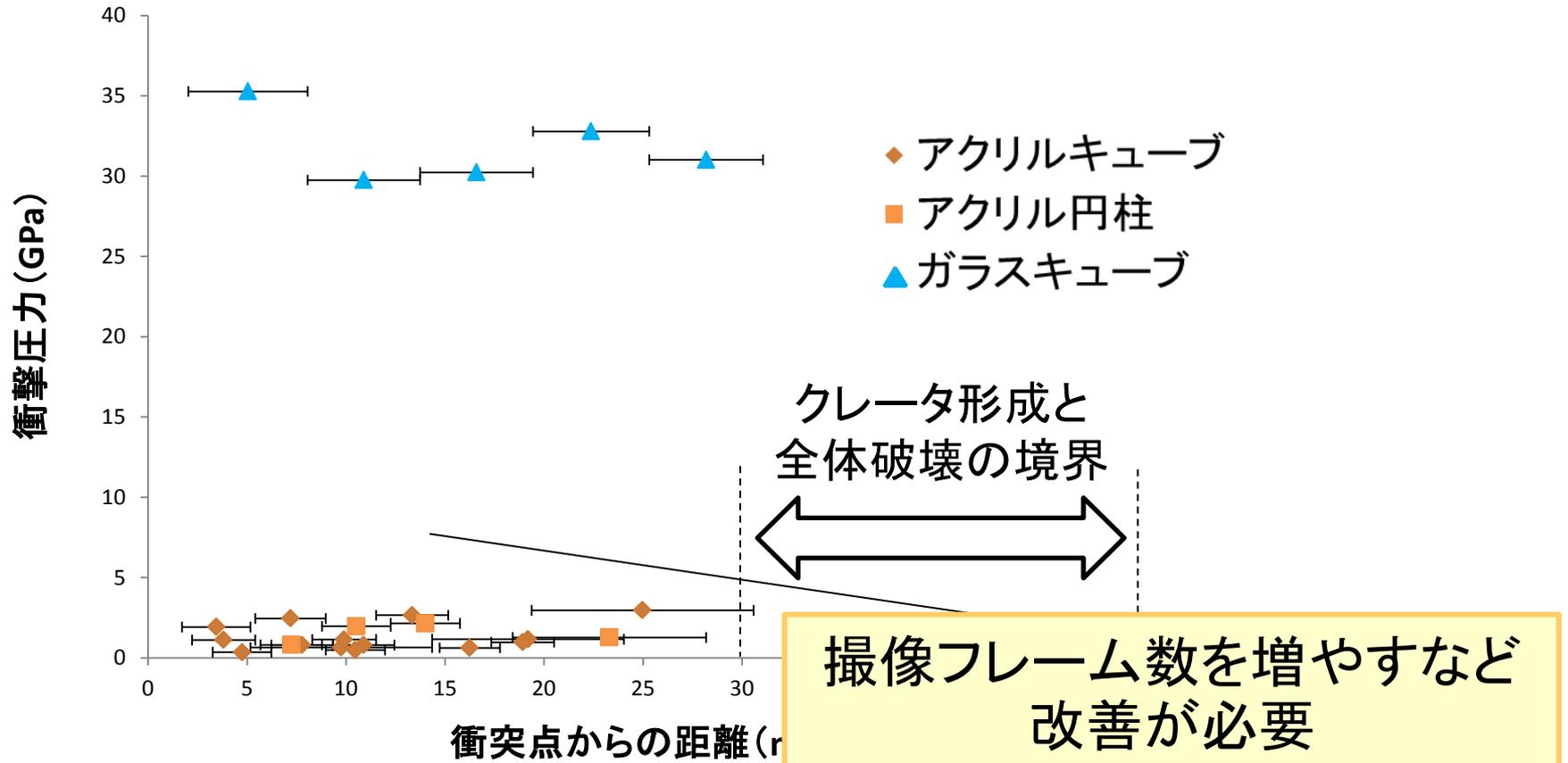
C, S:ターゲットの固有値



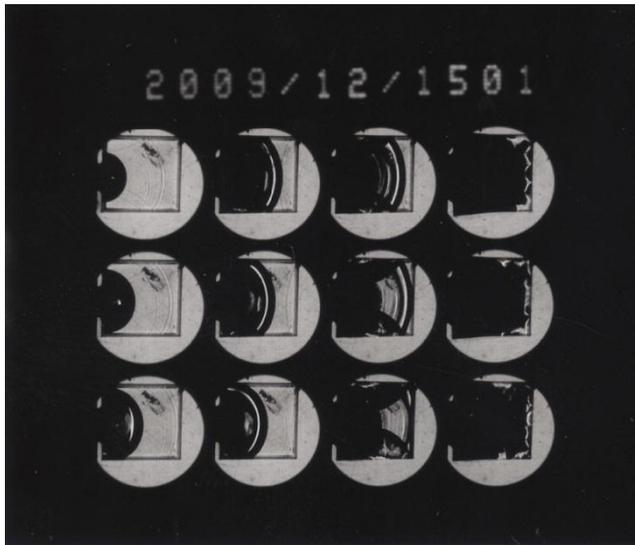
ターゲット内の各位置における衝撃波速度から衝撃圧力を見積もることができる

インピーダンスマッチング法によるターゲット内衝撃圧力の推定

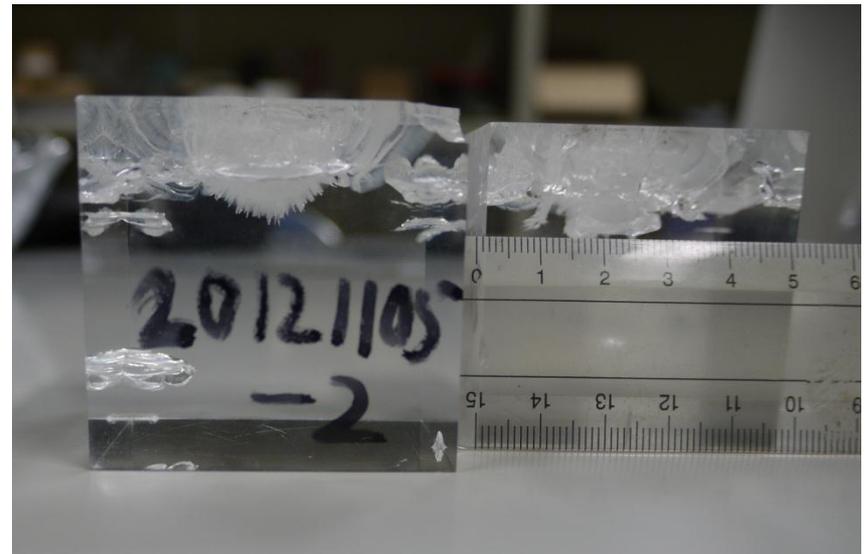
- アクリルキューブ・円柱, ガラスキューブの比較



補足



アクリルキューブ中
(衝撃波)



アクリルキューブ大
(横から見た図)