

衝撃波の可視化実験

藤田 航(東京大学)

岡本 尚也(神戸大学)

池崎 克俊(大阪大学)

背景・目的

- 地球科学において衝撃波を理解することは重要である。
- 例えば、衝撃波が生じることで物質内に変成作用が起こるが、これは惑星の熱史に大きな影響を及ぼす。
- そこで今回の実験では衝撃波の可視化を行いどのように物体内を動くのかを調べた。

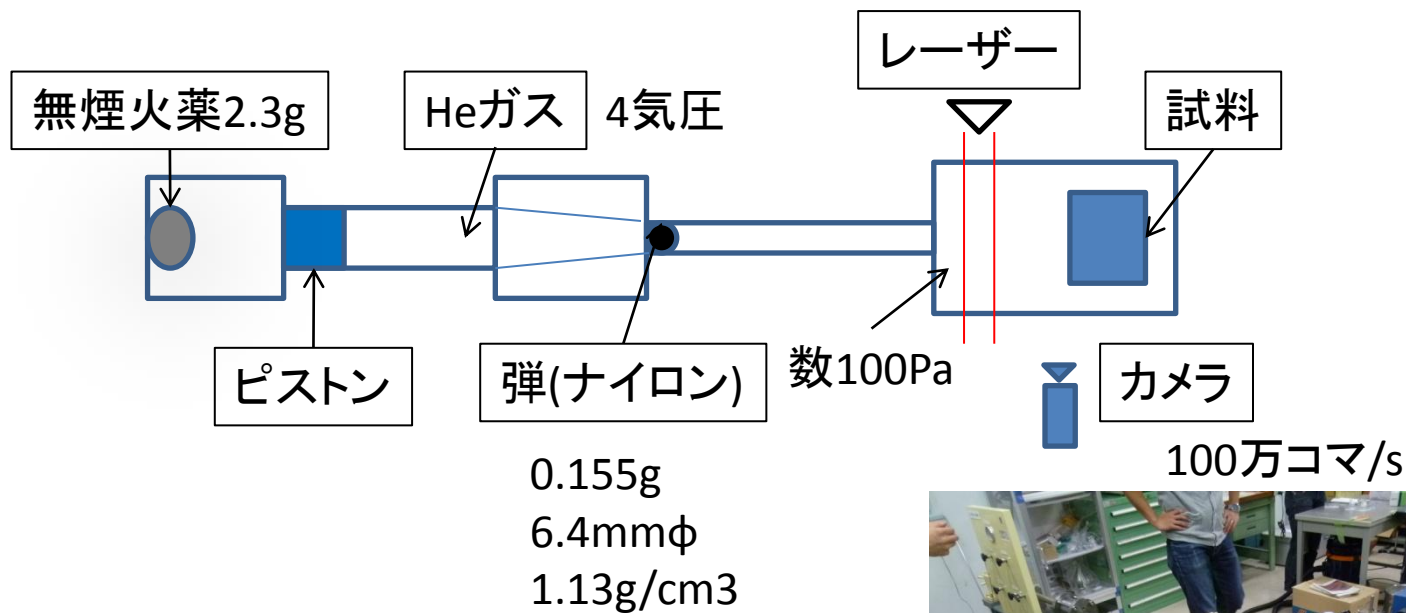
テーマ1

アクリルを伝搬する衝撃波の観察と 衝突破壊実験

- 二段式軽ガス銃を用いて衝突実験
- 高速度カメラで衝撃波の撮影
- 高速画像より衝撃波の速度解析
- 衝突実験による試料の破片の解析

実験装置

- 2段式軽ガス銃(名古屋大学)

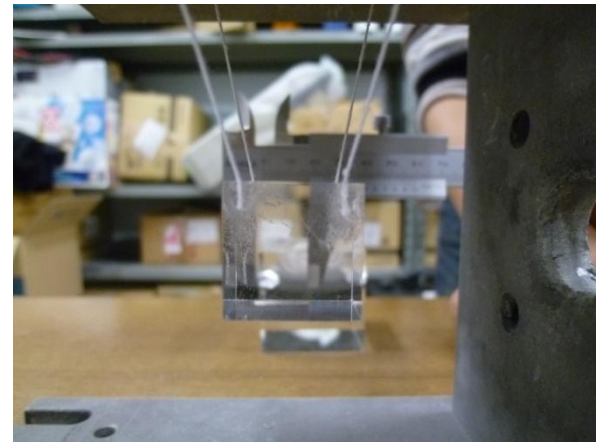


試料

ショットNo.	試料	質量(g)	大きさ(mm)	密度(g/cm ³)
101201-1	アクリル大	146.2	49.6*50.0*50.1	1.18
101201-2	アクリル中	32.2	30.2*30.0*30.1	1.18
101202-1*	アクリル小	9.1	19.4*20.2*20.0	1.16
101202-2	アクリル円柱	29.8	20.0h*40.0φ	1.19
101202-3#	アクリル小	9.1	19.4*20.2*20.0	1.16
101202-4	ガラス	518.3	59.0*59.4*58.9	2.51

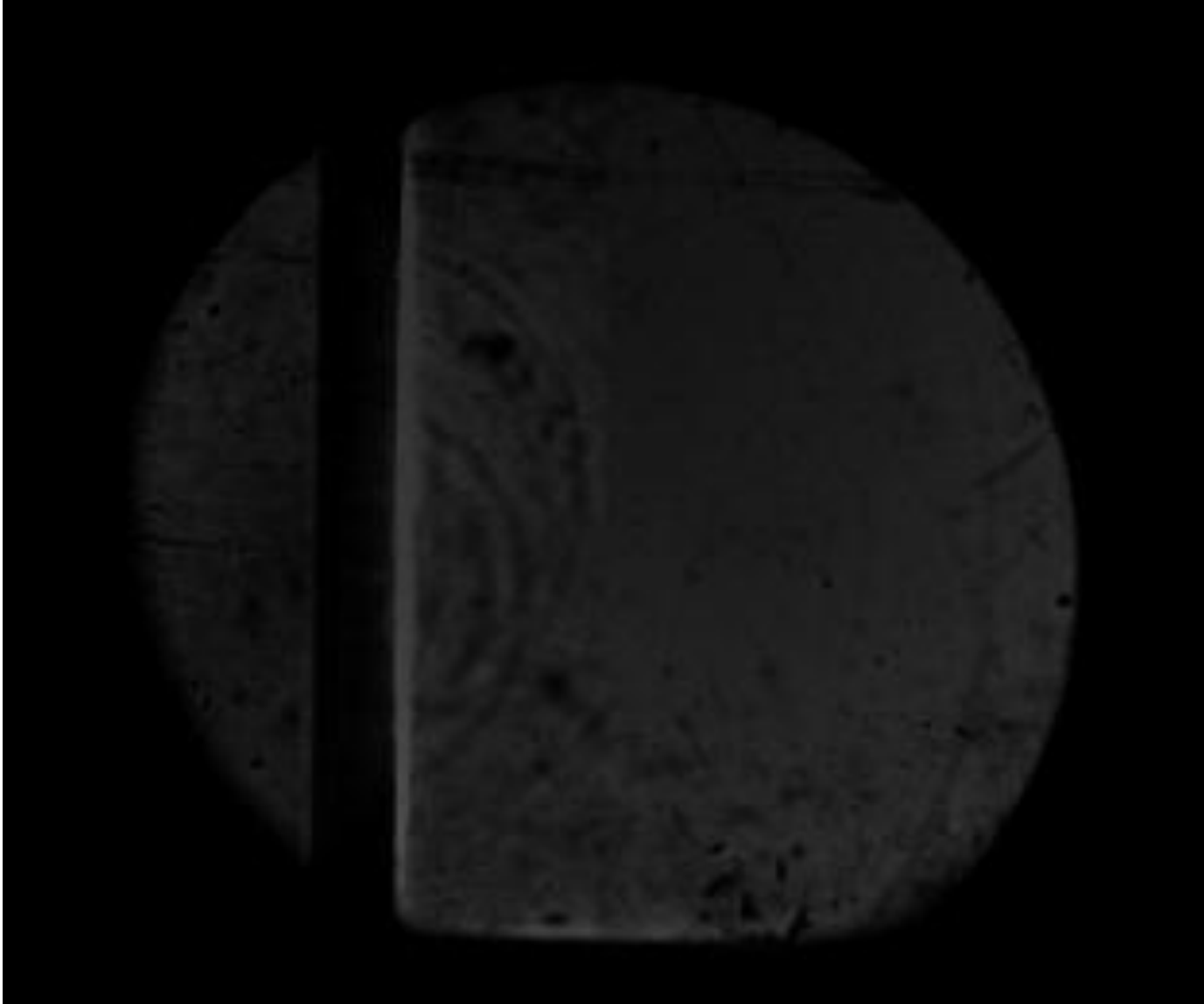
*:カメラの撮影を失敗

#:弾丸が加速時に割れた



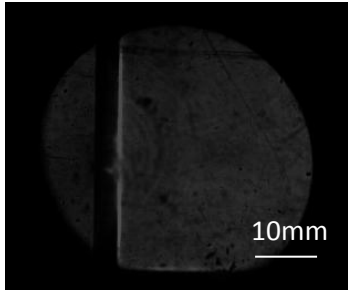
実験時にはアクリル大、ガラスは直に置き、
その他は上図のように糸で宙釣りにした。

101201-1:アクリル大

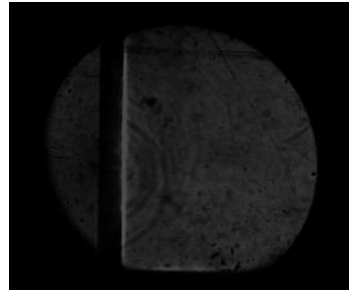


101201-1:アクリル大

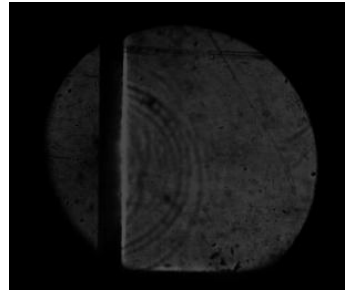
- 弾丸速度: 2.17km/s



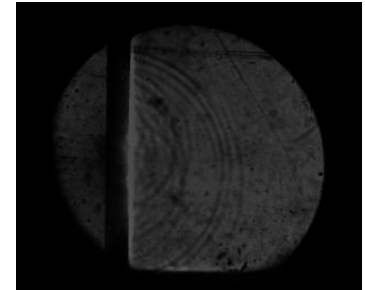
0 μ s



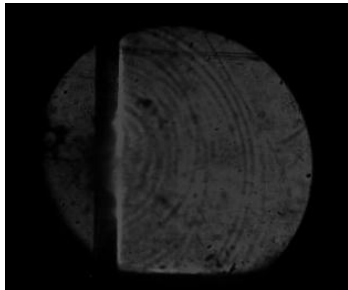
2 μ s



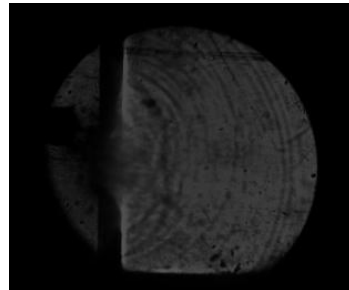
6 μ s



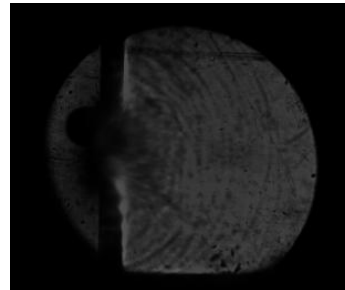
8 μ s



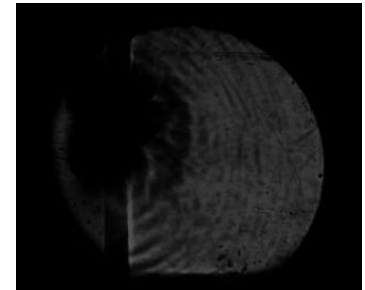
10 μ s



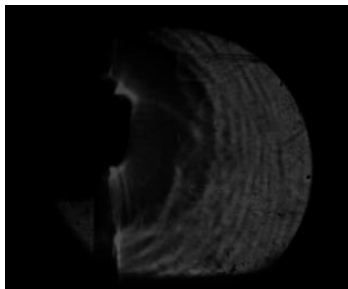
12 μ s



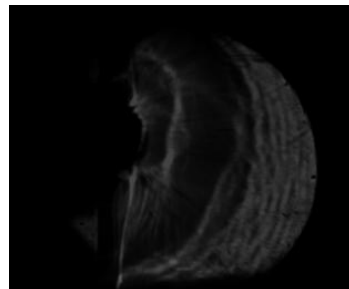
14 μ s



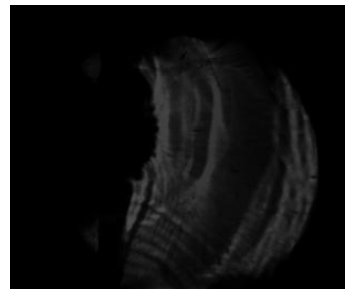
16 μ s



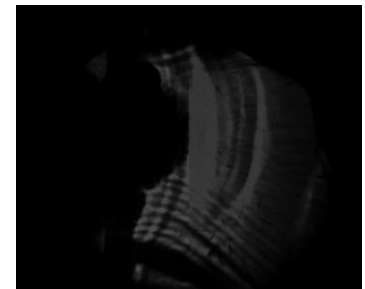
18 μ s



20 μ s



22 μ s



24 μ s

ユゴニオのデータ

$$P = \rho_0 U_P U_P$$

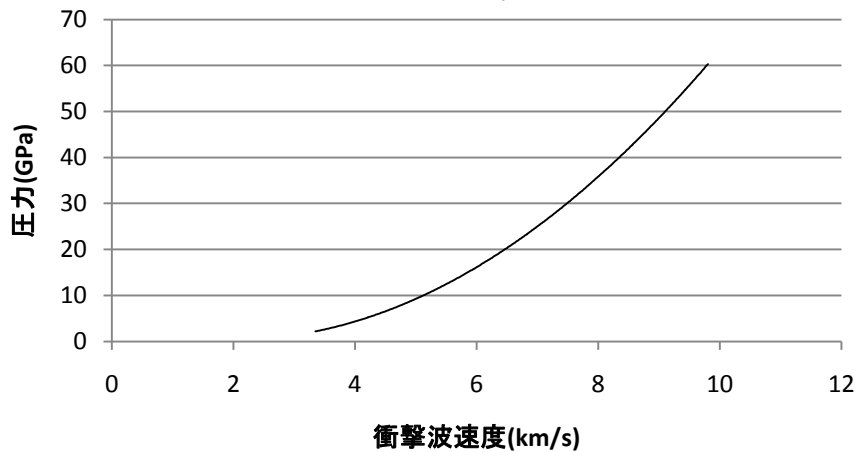
$$U_P = C + S U_P$$



Pは U_P の2次関数で表せる

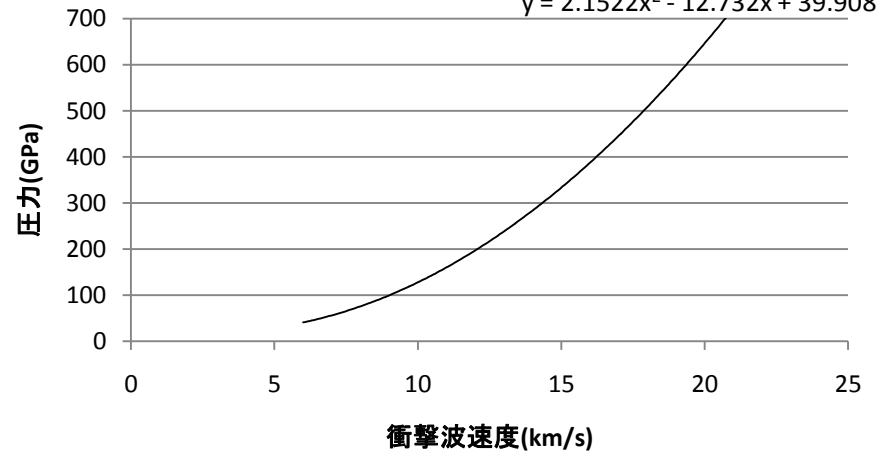
アクリル

$$y = 0.9811x^2 - 3.9004x + 4.2407$$



ガラス

$$y = 2.1522x^2 - 12.732x + 39.908$$



衝突点付近(5~10mm)の衝撃波速度 と圧力

	衝撃波速度 (km/s)	圧力(GPa)	音速(km/s)	
			P波	S波
アクリル大	2.86	1.11	2.72	1.31
アクリル中	2.86	1.11	2.72	1.34
アクリル小	3.39	2.30	2.75	1.40
アクリル円柱	2.86	1.11	2.72	1.38
ガラス	6.43	47.0	5.73	3.40



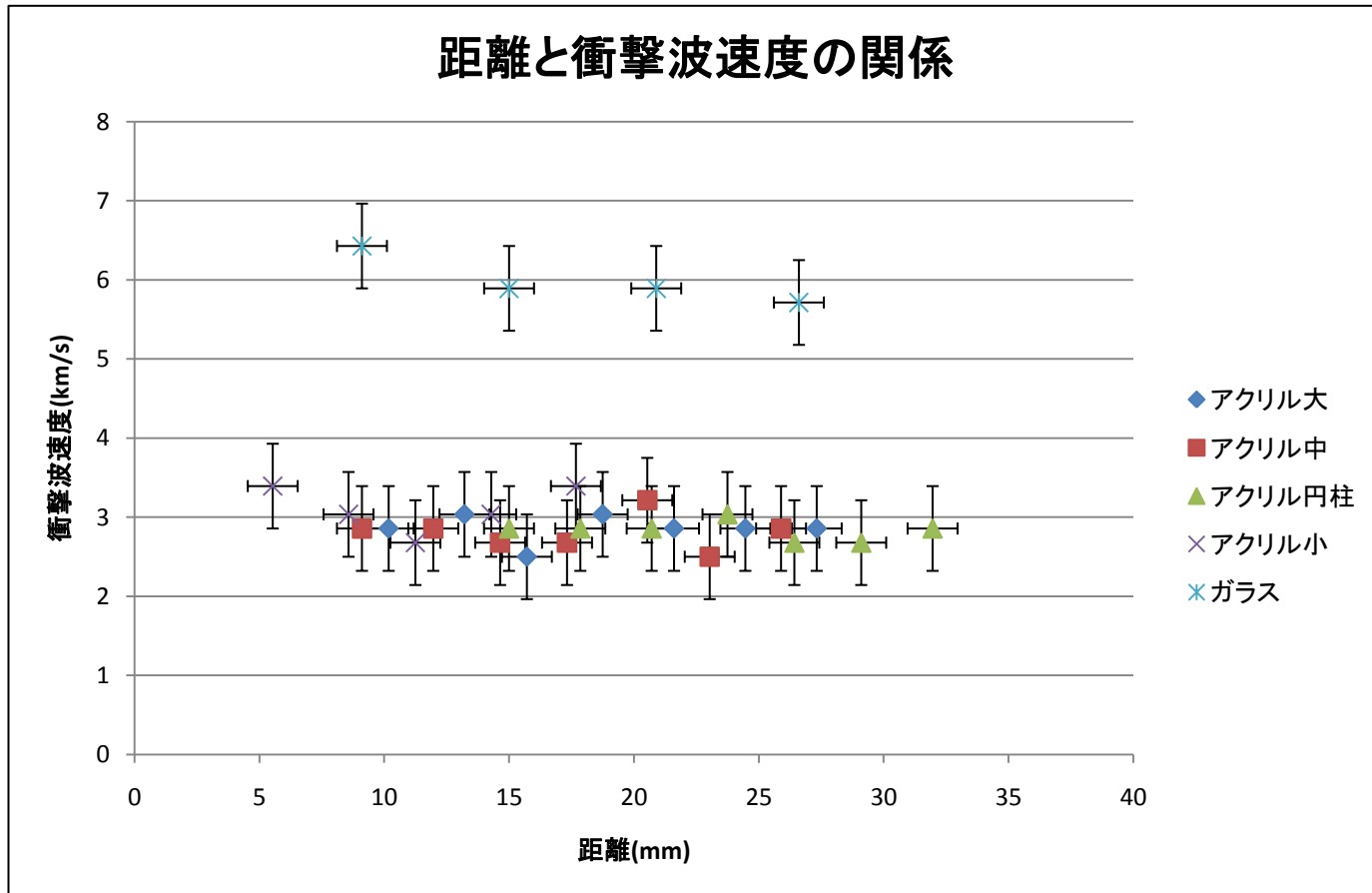
衝突点では音速よりも衝撃波速度は速い



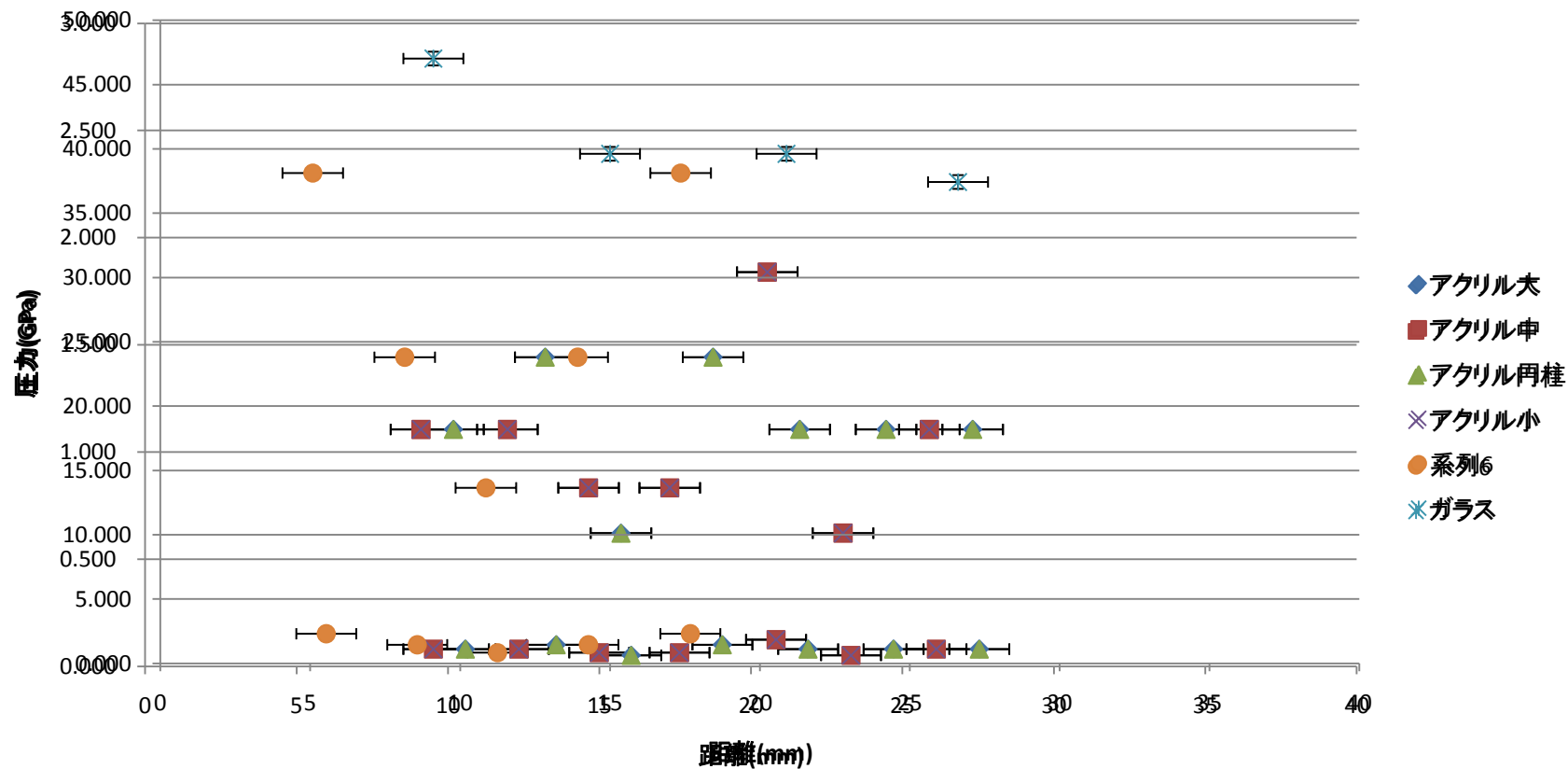
今回の衝突実験では衝撃波が発生している

解析

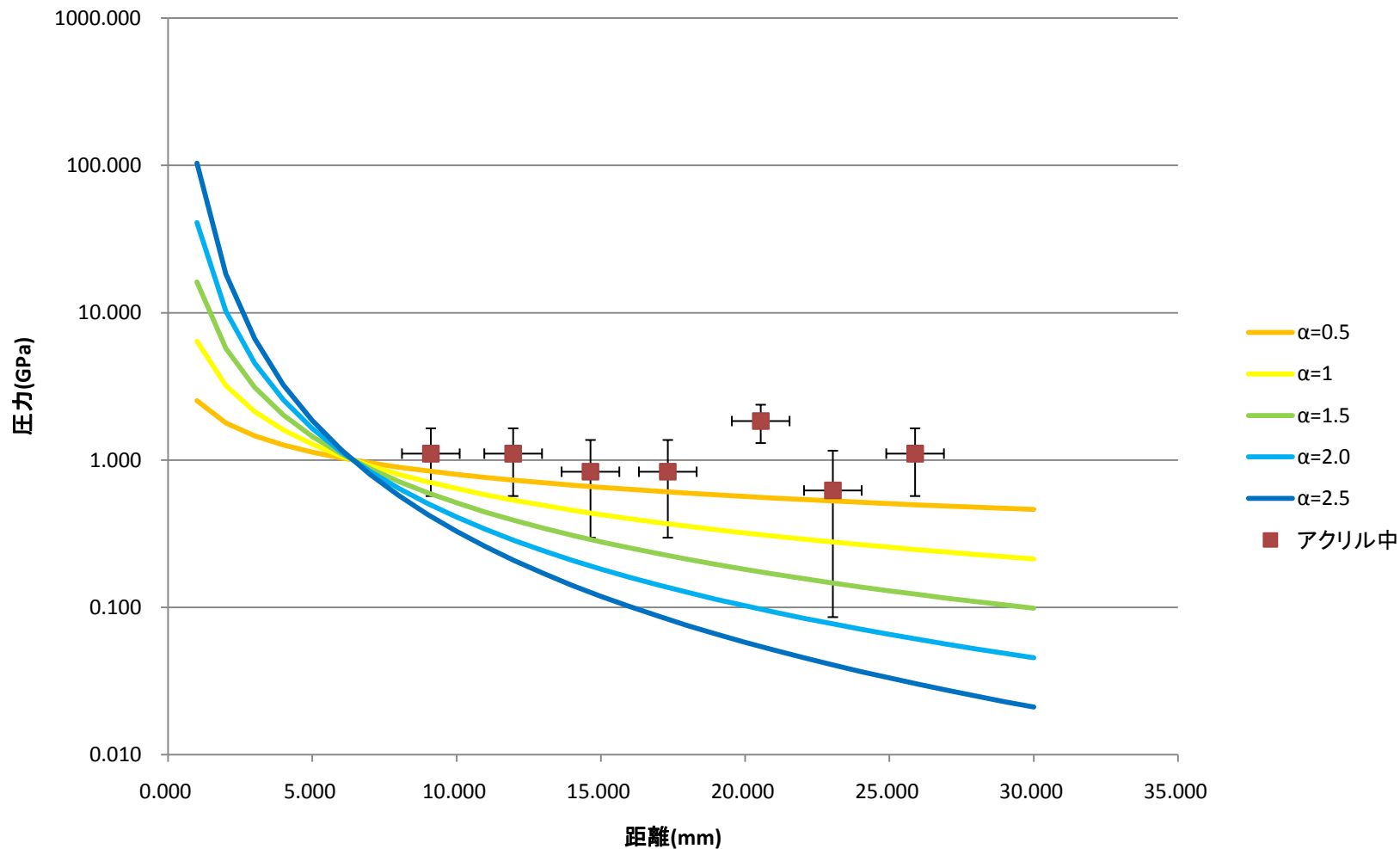
- 高速カメラ画像・ユゴニオデータから衝突点から衝撃波速度、圧力を計算



距離と圧力の関係



解析解と実験値の比較



$$P = P_0 \left(\frac{1}{\frac{r}{L_p}} \right)^\alpha$$

r:衝突点からの距離
Lp:弾丸の直径

結果・考察

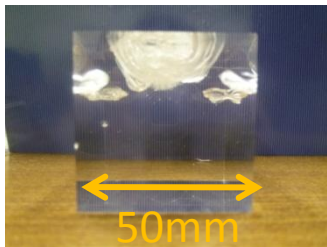
- ガラスには圧力の距離による減衰傾向が見られたが、アクリルの試料には見られなかった。
- ⇒音速に近い衝撃波速度では減速率は小さい？

破片解析

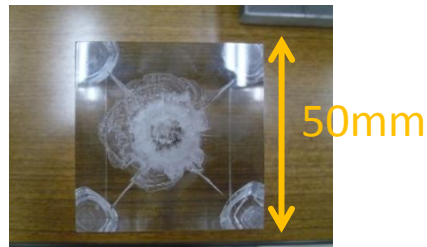
破片の質量分布

- ・ チャンバーから破片を回収
- ・ ふるい4mm以上の破片は個々に質量を測定
- ・ ふるい4mm以下のものはTakagi et al. 1984に従う

アクリル大



横から

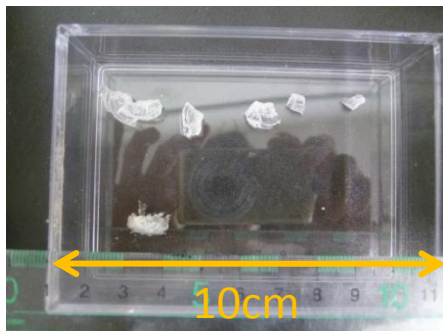


衝突点方向

ガラス



衝突点方向

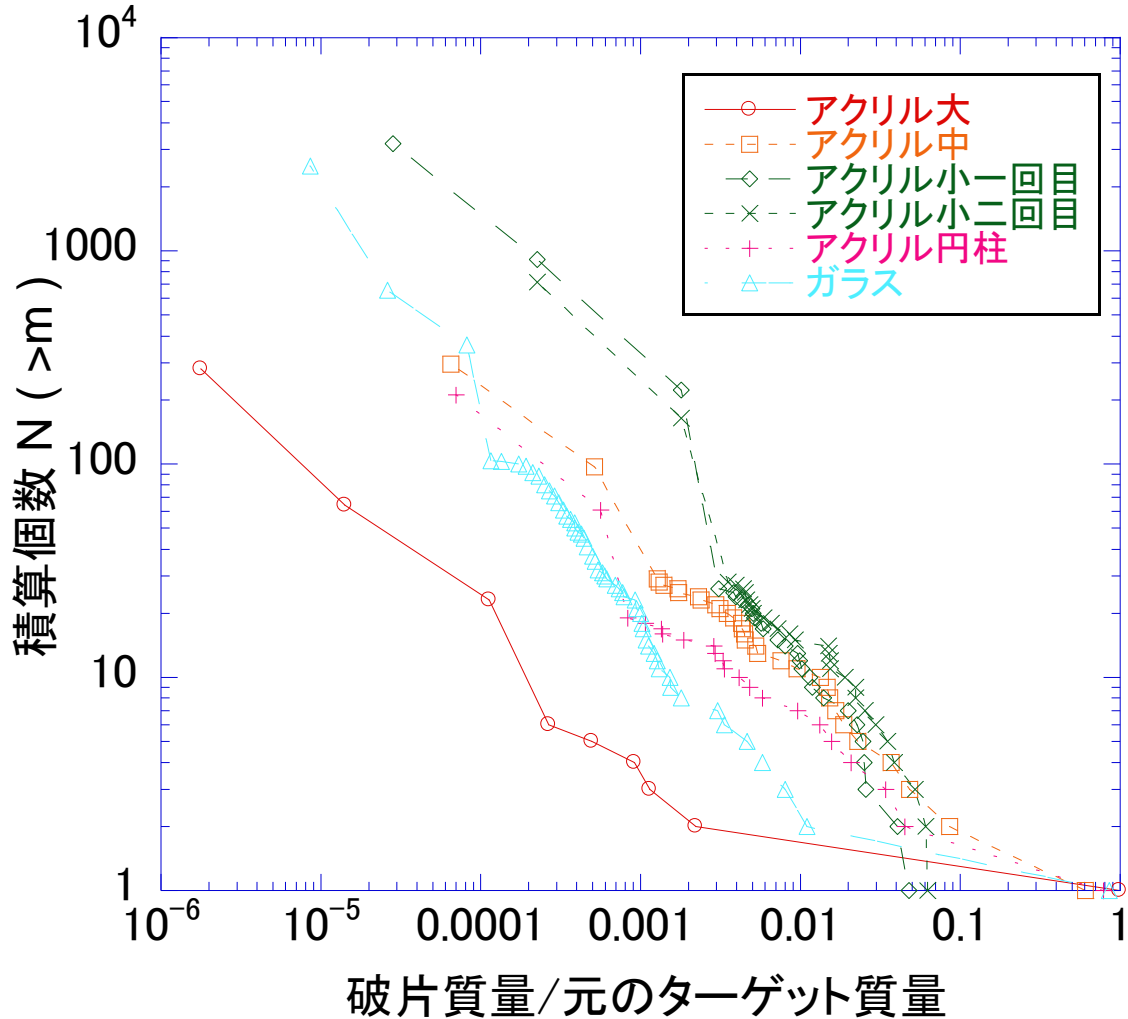


実験条件

	ターゲット質量 [g]	ターゲット大きさ [mm]	衝突速度 [m/s]
アクリル 大	146.2	49.6*50.0*50.1	2.17×10^3
アクリル 中	32.2	30.2*30.0*30.1	1.98×10^3
アクリル 小 1回目	9.1	19.4*20.2*20.0	1.99×10^3
アクリル 小 2回目	9.1	19.4*20.2*20.0	1.87×10^3
アクリル円柱	29.8	20.0h*40.0φ	2.09×10^3
ガラス	518.3	59.0*59.4*58.9	1.88×10^3

結果

積算個数と破片質量



・サイズが小さいほど
最大破片が小さい

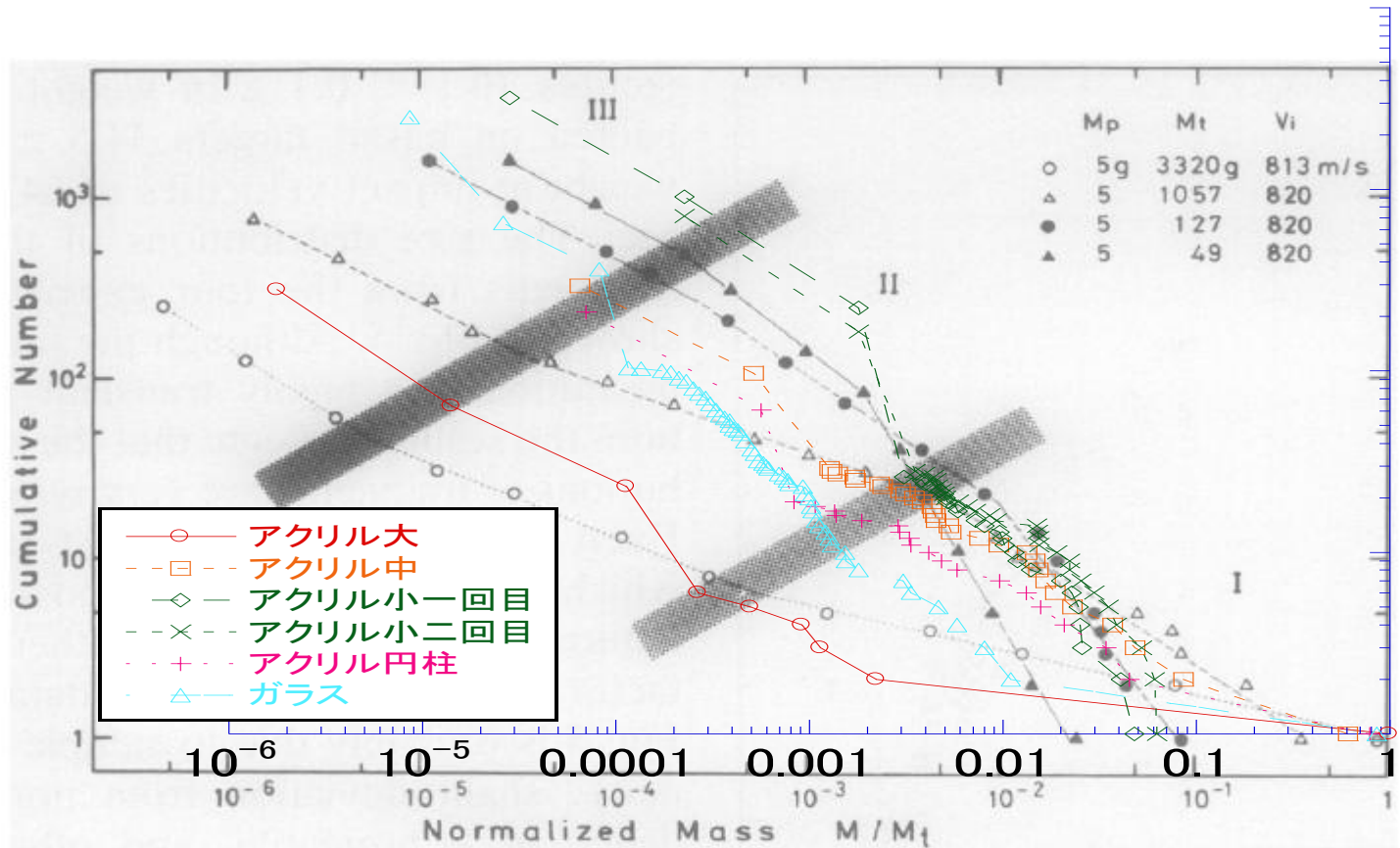
・サイズが小さいほど
破片数が多い

・サイズが小さいほど
最大破片からの
傾きが急になる

・破片質量が小さい
ところでの傾きはサ
イズによっていない

考察

過去の玄武岩への衝突実験との比較

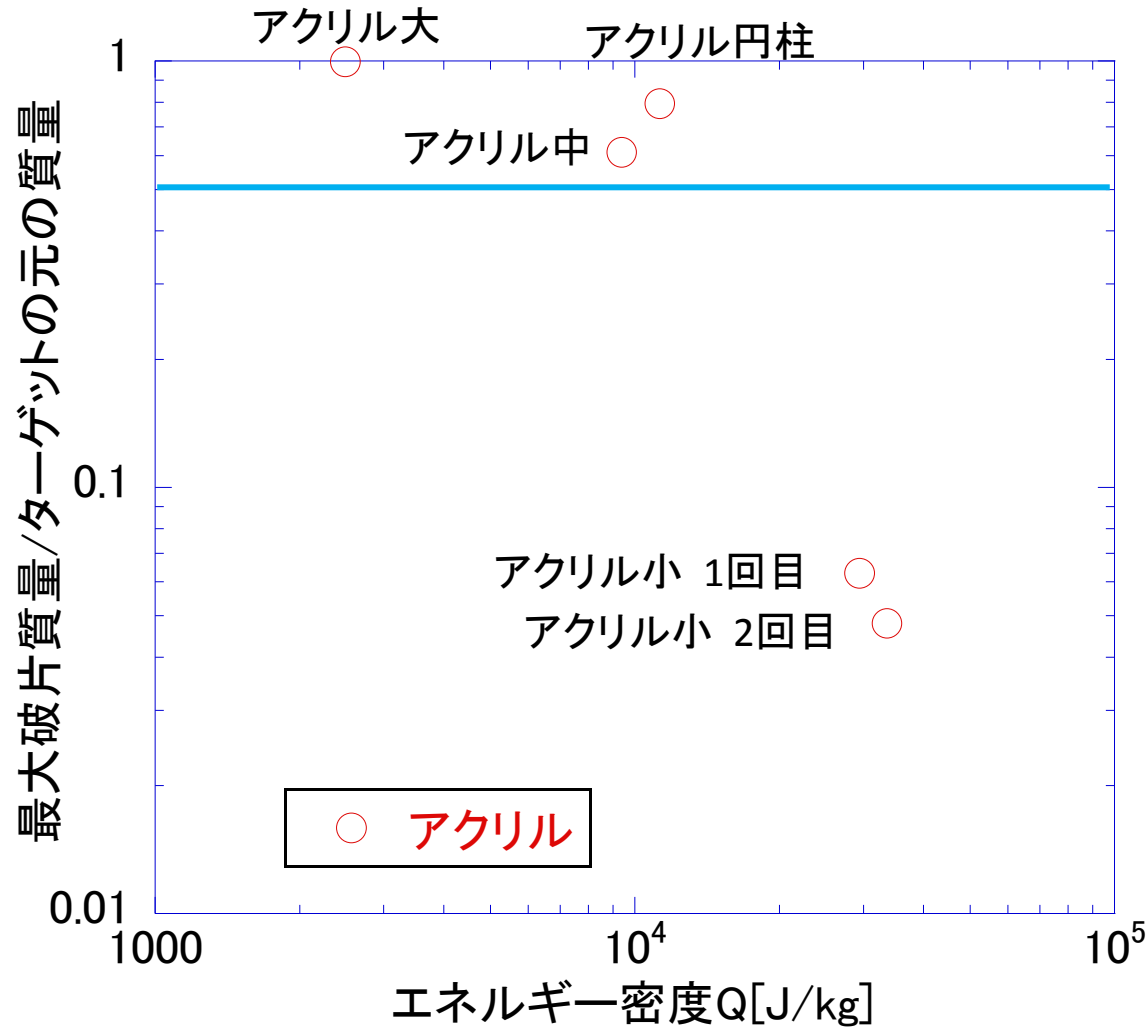


サイズによるグラフの傾向は玄武岩とアクリルでは似ている

Takagi et al. 1984 との比較

結果

エネルギー密度Qと最大破片質量の関係



$$Q = m_p v^2 / 2M_t$$

Q : エネルギー密度

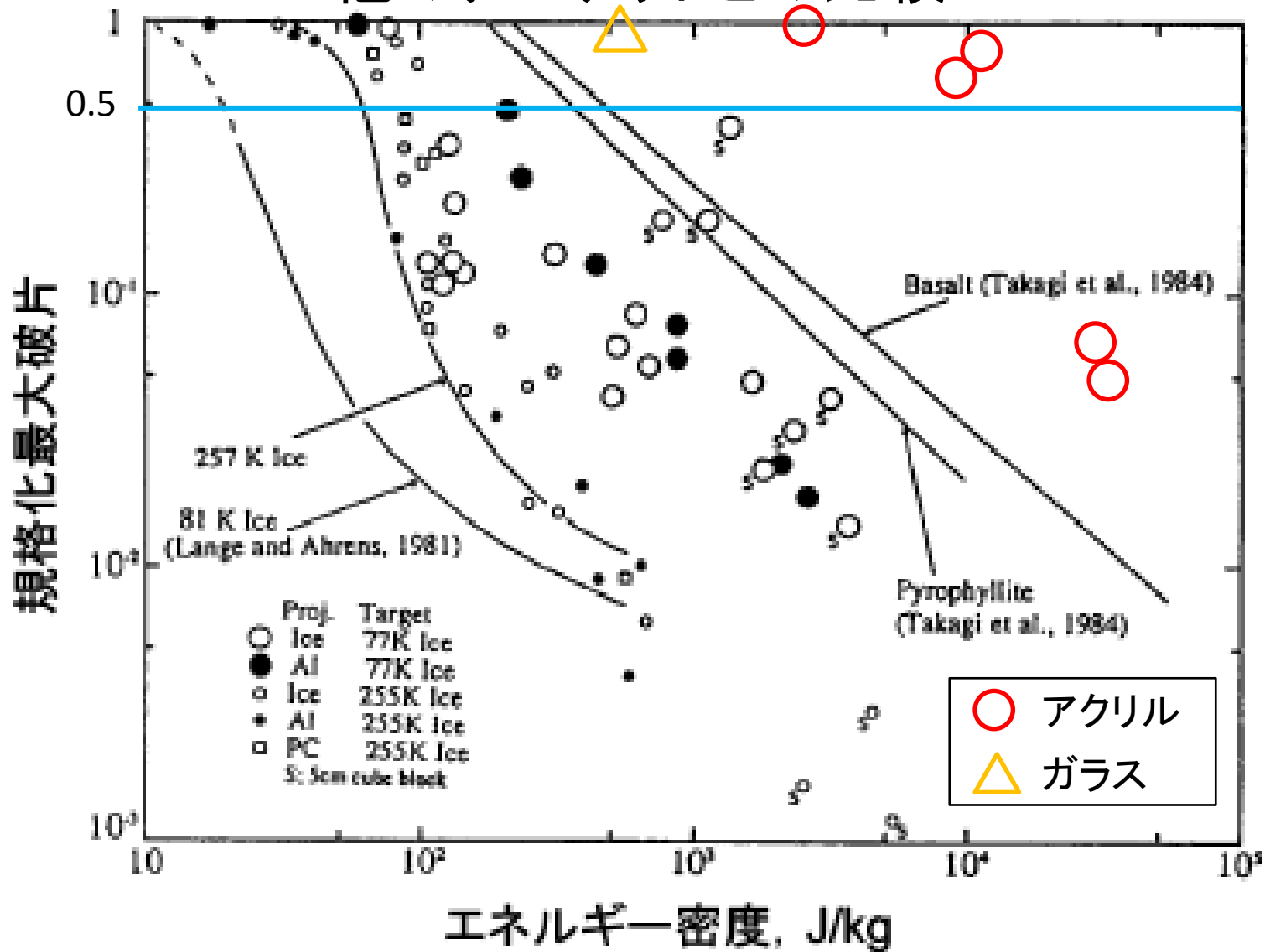
m_p : プロジェクトイル質量

M_t : ターゲット質量

v : 衝突速度

考察

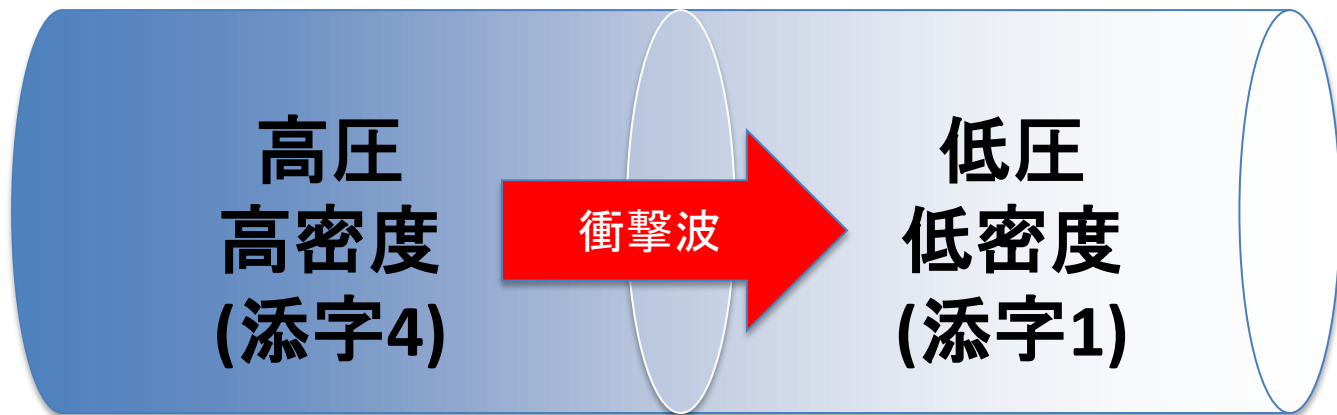
他のターゲットとの比較



テーマ2

- 空気中を伝播する衝撃波の観察
- 衝撃波管を用いて衝撃波を発生させる。
- 影写真法で可視化
- 空気中の衝撃波なのでマッハツェンダー干渉計を用いて干渉縞を作ってやり、波面を見やすくする。

衝撃波管



$$P_{41} = \left[\frac{2\gamma_1 M_s^2 - (\gamma_1 - 1)}{\gamma_1 + 1} \right] \left[1 - \frac{(\gamma_4 - 1)a_1}{(\gamma_1 + 1)a_4} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \right]^{-\frac{2\gamma_4}{\gamma_4 - 1}}$$

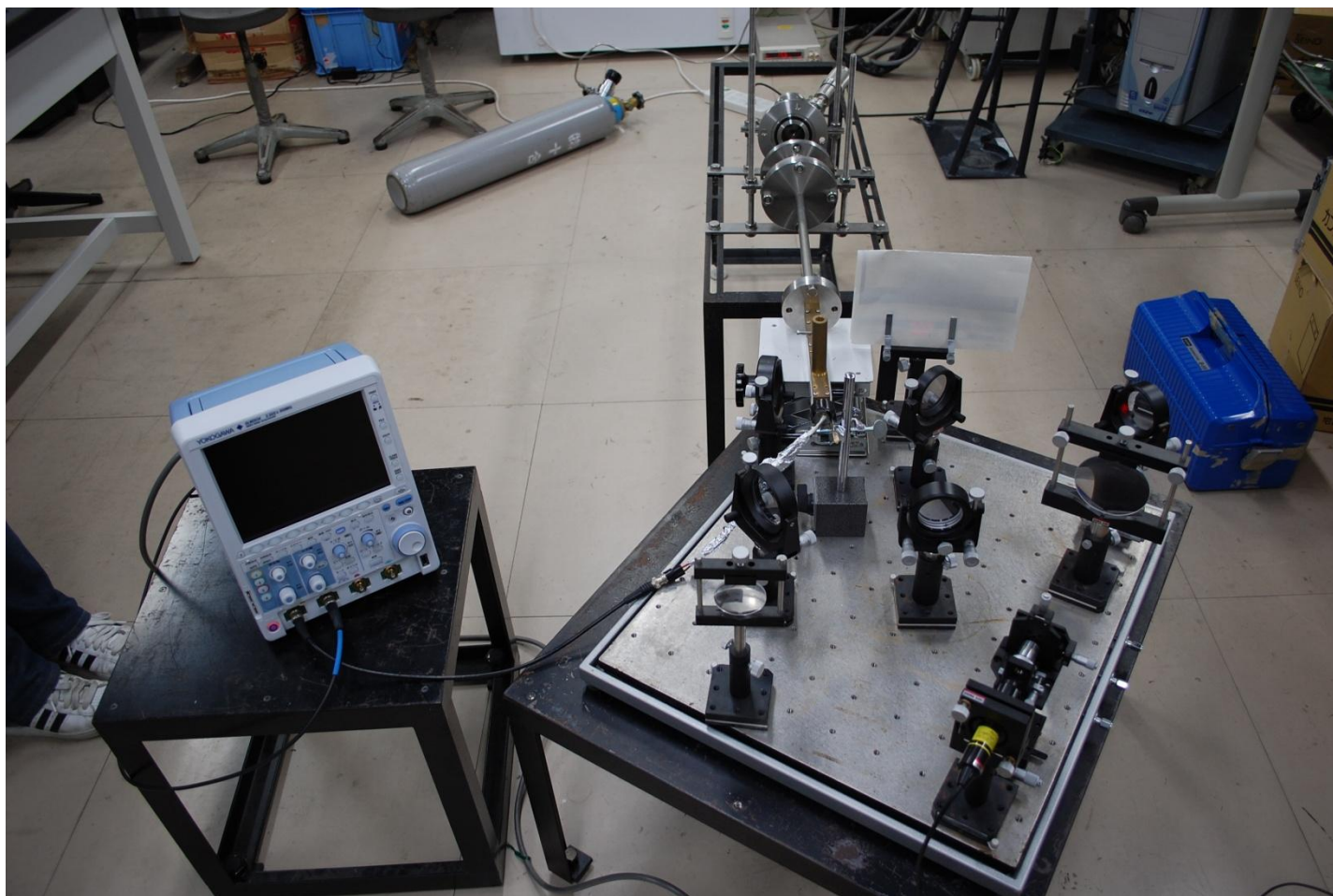
初期圧力比

γ : 比熱比

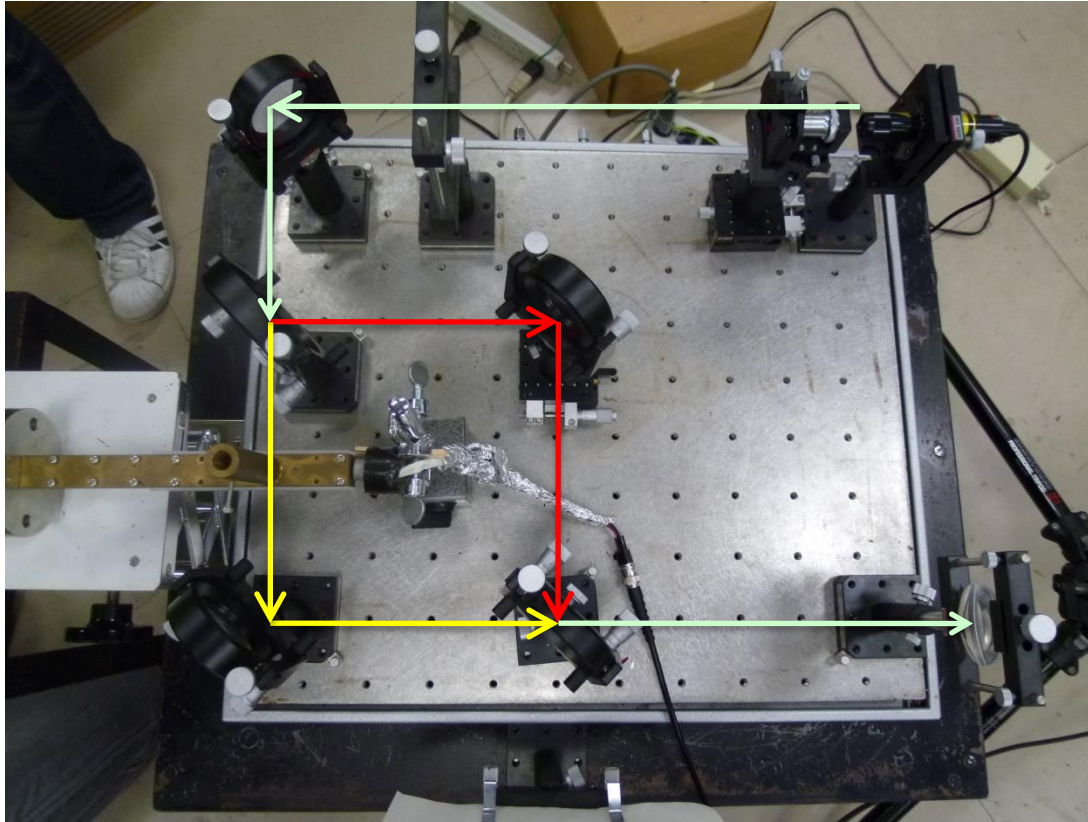
a : 音速

衝撃波
マッハ数

装置外観



マツハツエンダー干渉計



- 2つの光路の光路差を利用した干渉計
- 一方の光路に被測定物を入れると、屈折率が変化した部分だけ干渉縞が変化

密度ゆらぎの写真

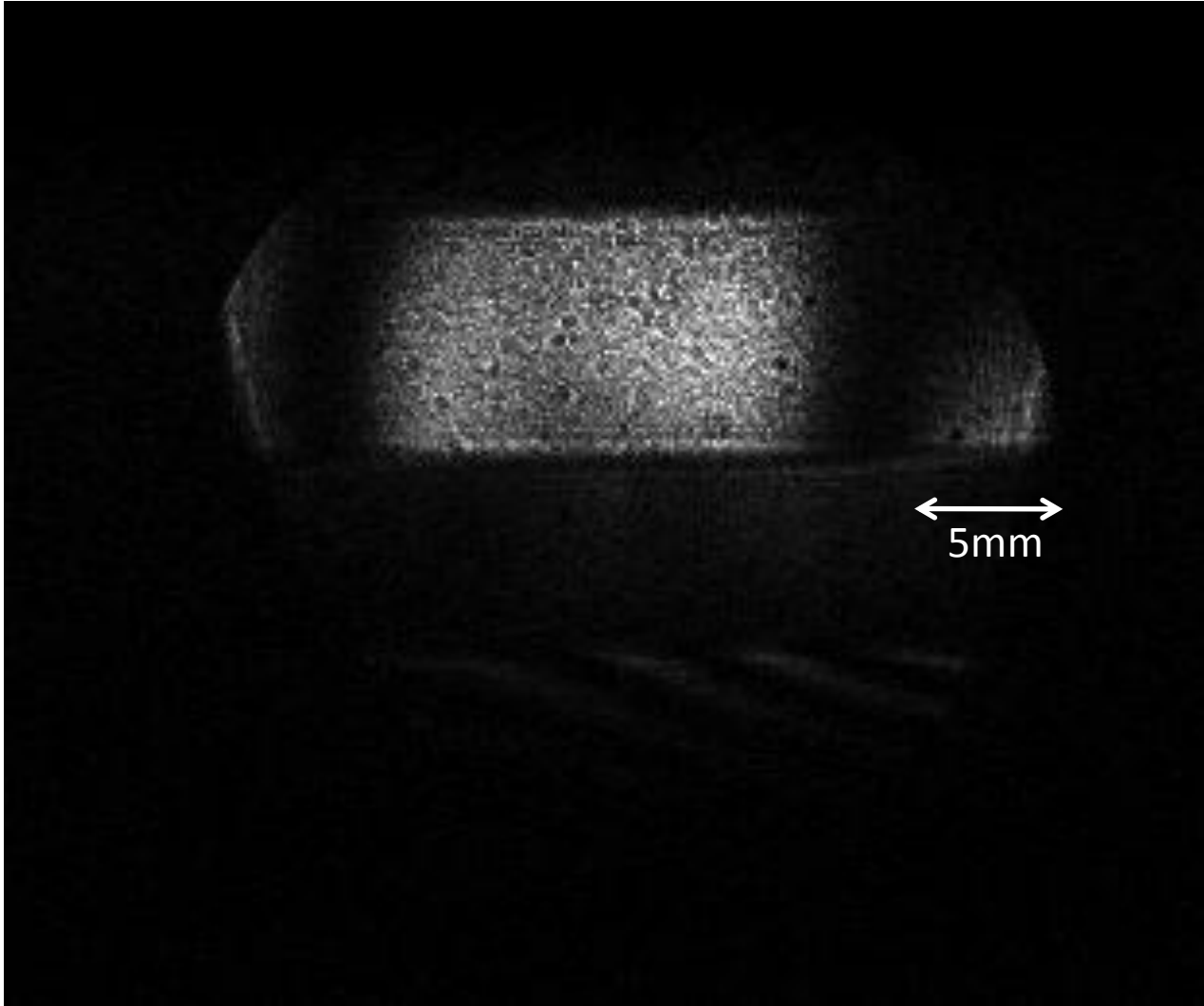


実験条件

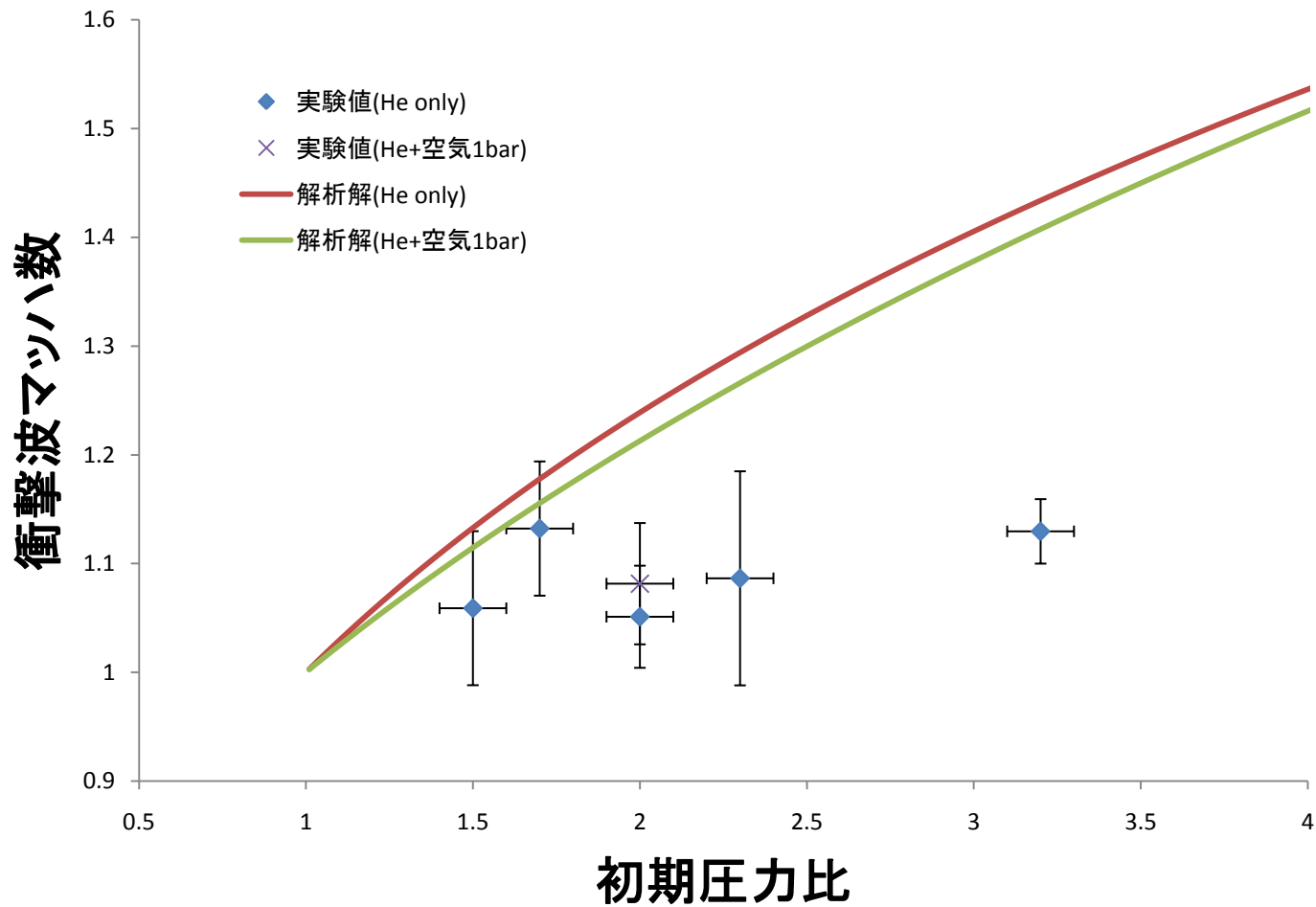
- 高圧室を真空にし、ヘリウムガスを1.2bar～3.2barの間の7通りの圧力で入れて、それぞれ実験を行った。
- 真空を引かなかった場合のデータも1点取った。

ショット No.	高圧室 の気体	圧力	結果
1	He + air	各1bar ずつ、計 2bar	成功
2	He	2bar	成功
3	He	1.5bar	成功
4	He	1.2bar	失敗
5	He	1.7bar	成功
6	He	2.3bar	成功
7	He	2.5bar	失敗
8	He	3.2bar	成功

実験結果



実験結果



考察

- 初期圧力比が小さい場合は解析解とのずれは比較的小さい。
- 初期圧力比が大きくなるほどずれは大きくなり、衝撃波マッハ数が小さくなる傾向。
- セロハン膜が圧力差で伸びてたわんでしまったことが原因？

⇒ 針の刺さり具合やセロハン膜の割れ方にも影響

改善点

- 真空を引いたりしてもたわまず、なおかつ全体が一斉に割れるような膜(例えば、金属製のダイヤフラムなど)を用いるべき。
- 低圧室側でも真空を引くことによって、両室の圧力差が比較的小さい状態で初期圧力比を大きくとることが出来る。