

火薬類の物理的性質に関する研究について (II)

-高エネルギー物質の起爆現象のモデル化の歴史と動向-

(独) 産業技術総合研究所 安全科学研究部門
久保田 士郎

高エネルギー物質の爆発影響評価

外乱の作用

(たとえば高速衝突)



固体→ 気体

高速で膨張

圧力解放

反応開始

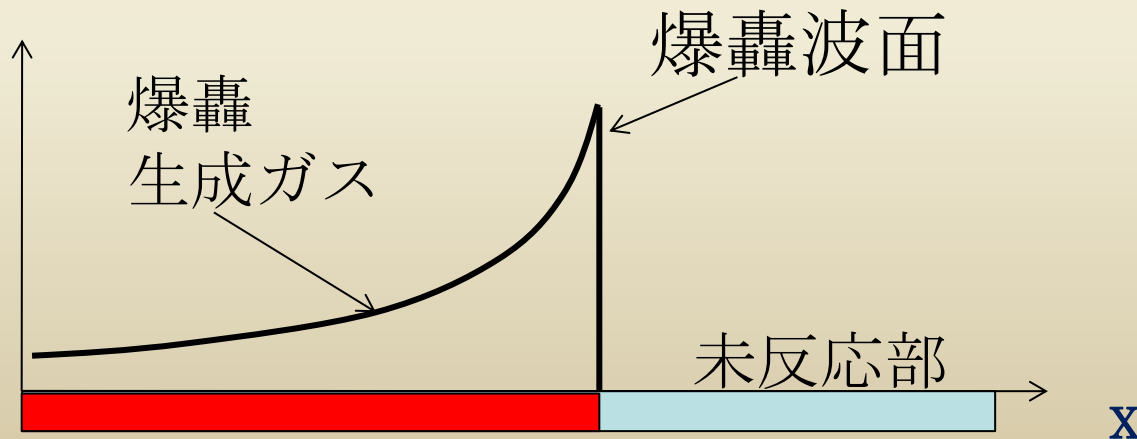
→ 激しい燃焼



大変形, 破壊
飛散物, 地盤振動
爆風

爆轟 (Detonation)

圧力



事の始まり (1880年頃)

フランスで管中の可燃性ガスの火炎速度が調べられた。
多くの物質で、秒速数m程度の火炎伝播速度が観測された。
しかし、火炎が秒速2千mを超える一定速度で伝わる現象
が観測された。→ 爆轟と呼ばれた。

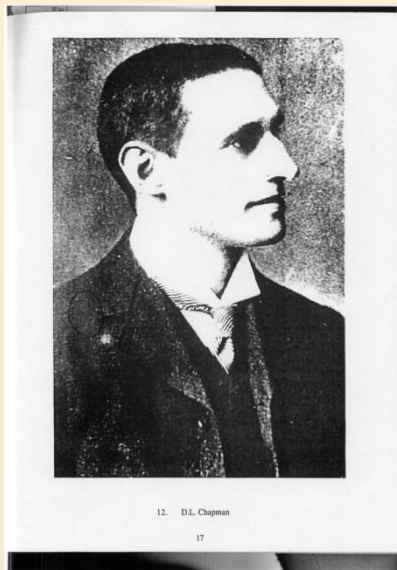
(Courant and Friedrichs, Supersonic flow and shock wave)

音に関する研究は1877年レイリーにより整備されていた。
1879年代ころにはギブスにより熱力学の整備も進んだ。

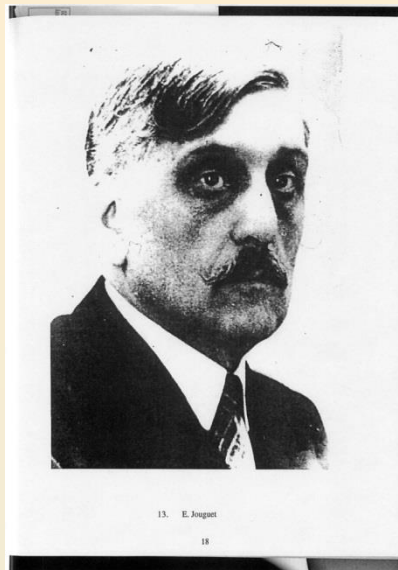
衝撃波の研究 (音よりも速い波)

ランキンは1870年、ウゴニオは1887年に衝撃波理論に
関する論文を発表した。

ChapmanとJouguet (爆轟基礎理論 C-J仮説)



1899年論文発表



1906年論文発表

衝撃波

+ α

→ 化学反応は一瞬で終わる。
完全に反応が終わって平衡
が達成された瞬間から考える。

火薬類の歴史

- ・ダイナマイトの発明：Alfred Nobel (1866年)
- ・高性能爆薬

TNT(1863)、ピクリン酸(1867)、PETN(1891)、RDX(1899)



C-J仮説の応用

気相系の高エネルギー物質

爆轟状態を予測可能 (1960年)

(その後、3次元的な構造が明らかになった)

固体・液体（凝縮系）の高エネルギー物質

状態式が不明＝爆轟状態を予測できない

1950年代から、爆轟生成ガスの状態式が主テーマ。

C-J仮説が適用できない爆轟現象

非理想爆轟 (Non-Ideal Detonation)

限界薬径，爆轟速度が薬径に依存して変化 (=薬径効果)

高エネルギー物質の爆発影響評価

外乱の作用 (たとえば高速衝突)



反応開始

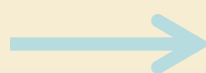


激しい燃焼



ここで止めれば被害は拡大しない

固体→ 気体
高速で膨張
圧力解放



大変形, 破壊
飛散物, 地盤振動
爆風

高エネルギー物質の起爆現象の モデル化に関する研究

起爆現象は均質系と不均質系に分けられる

- 不均質系爆薬（本日のテーマこれに集中）
一般的な固体爆薬；ホットスポット

発表内容

高エネルギー物質の起爆現象
に関する研究の歴史と動向

反応流れシミュレーション
に対する我々の研究展開

研究の歴史と動向

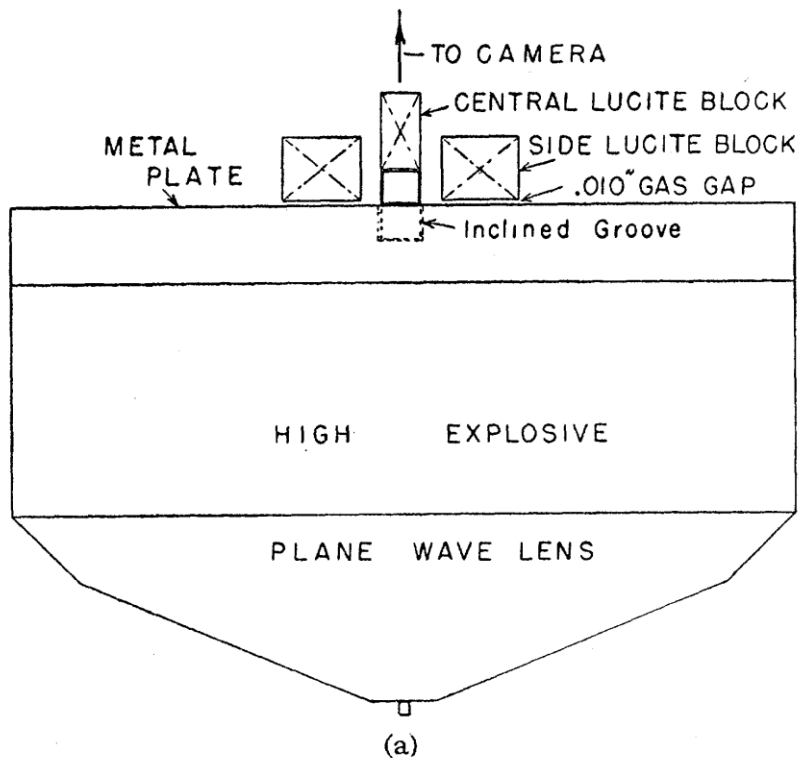
Detonation Symposium

- 1 1951 Washington, District of Columbia
- 2 1955 Washington, District of Columbia
- 3 1960 Princeton, New Jersey
- 4 1965 Silver Spring, Maryland, 1st International
- 5 1970 Pasadena, California
- 6 1976 Coronado, California
- 7 1981 Annapolis, Maryland
- 8 1985 Albuquerque, New Mexico
- 9 1989 Portland, Oregon
- 10 1993 Boston, Massachusetts
- 11 1998 Snowmass, Colorado
- 12 2002 San Diego, California
- 13 2006 Norfolk, Virginia
- 14 2010 Coeur d'Alene, Idaho

Equation of State of Metals from Shock Wave Measurements*

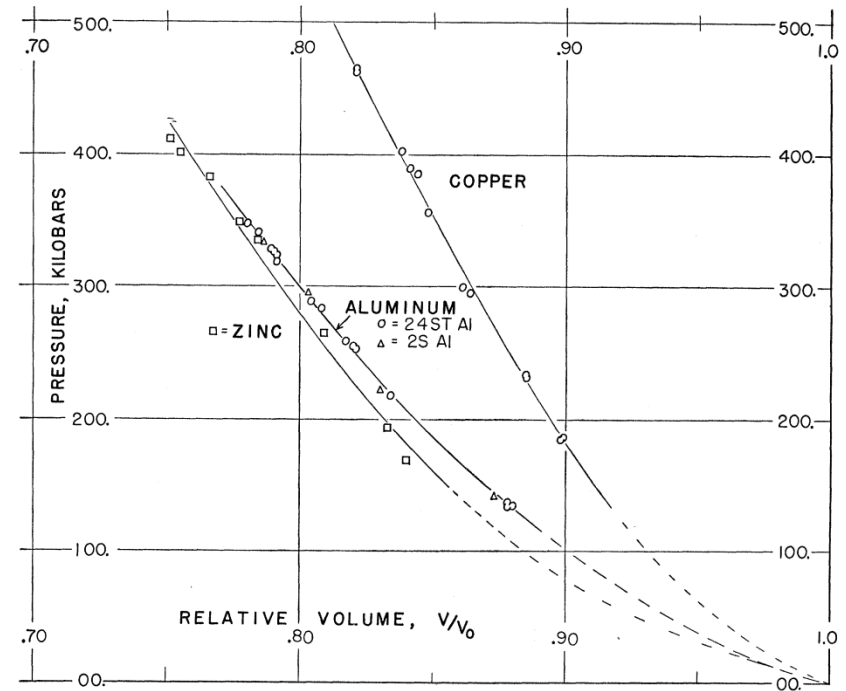
JOHN M. WALSH AND RUSSELL H. CHRISTIAN†
Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico

(Received October 21, 1954)



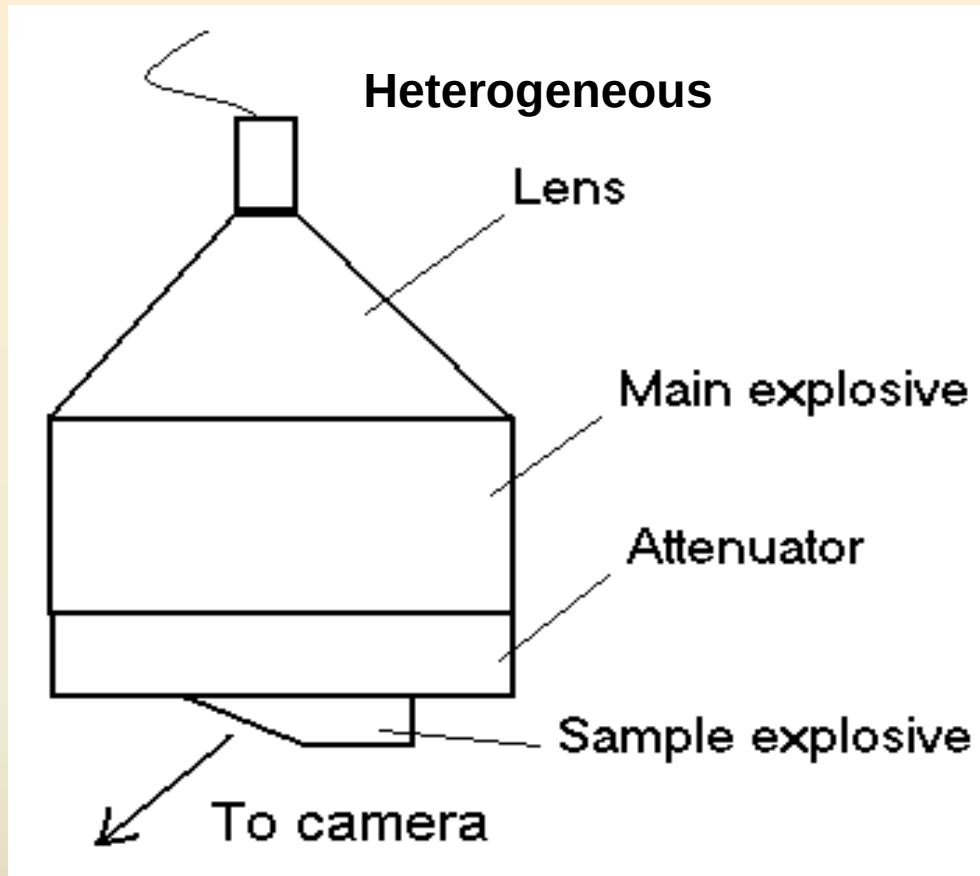
1552

J. M. WALSH AND R. H. CHRISTIAN



爆轟転移過程を見る

研究の歴史と動向



An explosive - booster attenuator system
(ウェッジ・テスト)

爆薬レンズにより主爆薬を平面起爆し一次元的な衝撃をサンプル爆薬に作用させる

衝撃波先頭の軌跡を観測

一次元衝撃起爆実験（円筒状の装置断面）

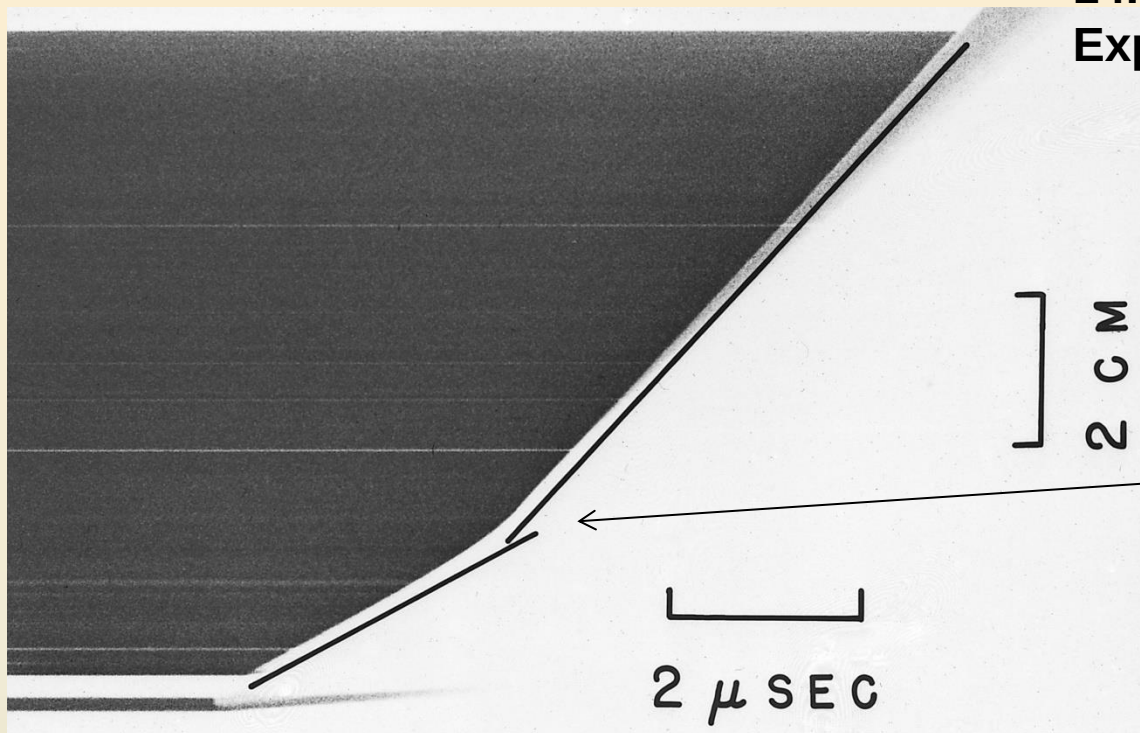
第3回 Shock Initiation of Solid Explosives, A.W. Campbell, W.C. Davis, J.B. Ramsay and J.R. Travis, USA

A. W. Campbell, W.C. Davis, J. B. Ramsay and J. R. Travis, The physics of fluids, 4, 4, 1961, Shock initiation of solid explosive

ウェッジ・テストの結果

研究の歴史と動向

14. Shock Desensitizing of Solid Explosive, W. C. Davis



変曲点が現れる
爆轟転移点 (SDT)

爆轟誘導距離

Figure 1. Streak camera record for initiation of explosive for a wedge. The distance up the wedge face is proportional to the distance the plane wave has traveled in the explosive. Acceleration is very small at first, but becomes large and makes the transition to detonation. From reference 1.

研究の歴史と動向

Pop plot: Ramsay and Popolato ,
4th international detonation symposium

入射圧力と爆轟誘導距離との関係
(Pop plot)

両対数グラフ上で直線関係
シミュレーションに応用

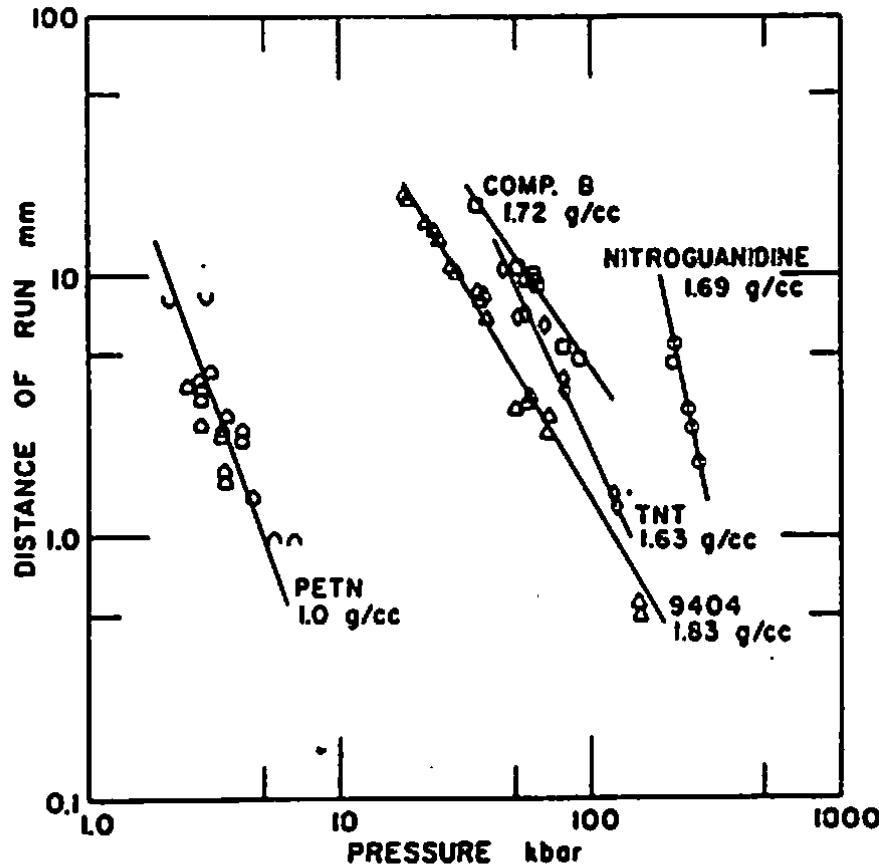


Fig. 4 - Relationship Between Distance to Detonation and Initial Shock Pressure for Various Explosives. The open symbols for PETN represent the maximum and minimum distances which could be measured. The points are located at the calculated pressures. The data for PETN are taken from Seay and Seely [16].



Single curve buildup

Forest fire モデル

7. Burning and Detonation,
C.A. Forest, USA
(1970年にレポート発表)

研究の歴史と動向

ウェッジ・テストは衝撃波先頭の情報

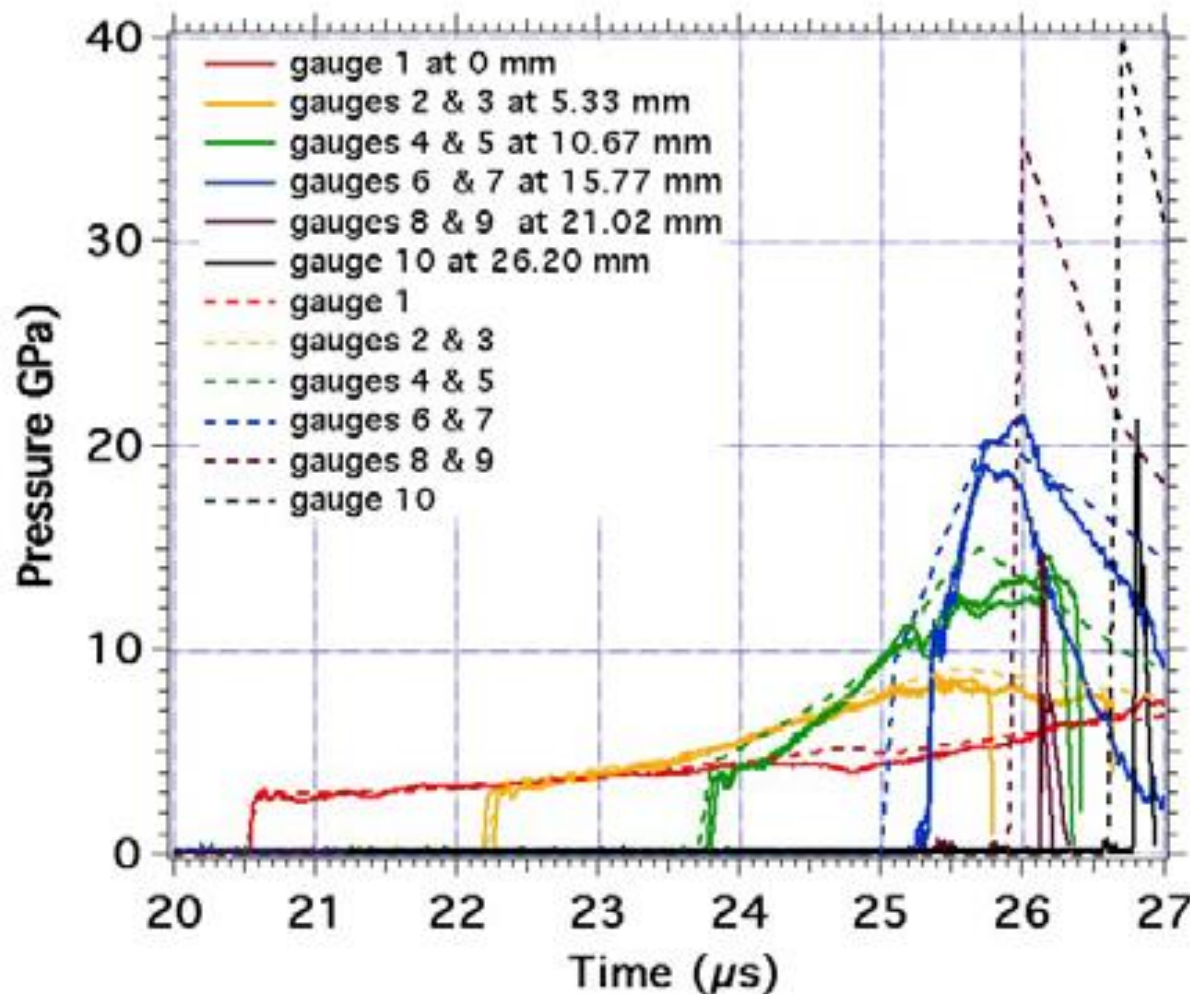
衝撃波後方で何が起きているか知りたい。

爆薬埋め込み式の
粒子速度ゲージ
圧力ゲージの開発



(第6回国際デトネーションシンポジウム)

- Shock Initiation of High Density PETN, J. Wackerle, J.O. Johnson and P.M. Halleck, USA
- A Multiple Lagrange Gage Study of the Shock Initiation Process in Cast TNT, M. Cowperthwaite and J.T. Rosenberg, USA



研究の歴史と動向

衝撃波後方の現象
が観測できた。



反応流れ計算で再現

起爆モデル

Ignition and Growth (1980)

JTF モデル

CRST モデル (2006)

Figure 6. Calculated pressure histories for C-4 impacted by an aluminum flyer at 0.737 km/s.

13. Shock Initiation Experiments and Modeling of Composition B and C-4, P.A.

Urtiew, K.S. Vandersall, C.M. Tarver, F. Garcia and J.W. Forbes, USA

2段衝撃波による起爆

12. Single and Double Shock Initiation of EDC 37, D.A. Salisbury, P. Taylor, R.E. Winter, R.L. Gustavsen, S.A. Sheffield and R.R. Alcon, UK

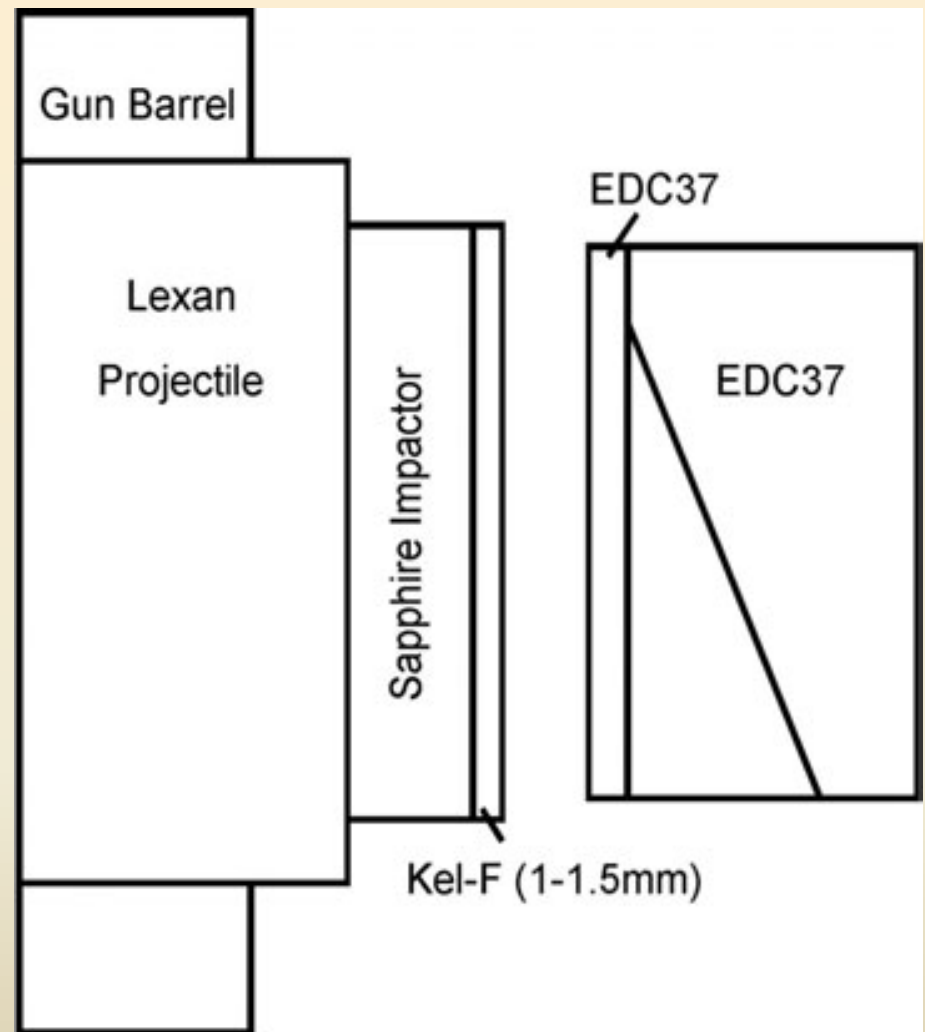


FIGURE 1. Set-up for double shock study. Experiments are fired with and without EDC37 disc.

研究の歴史と動向

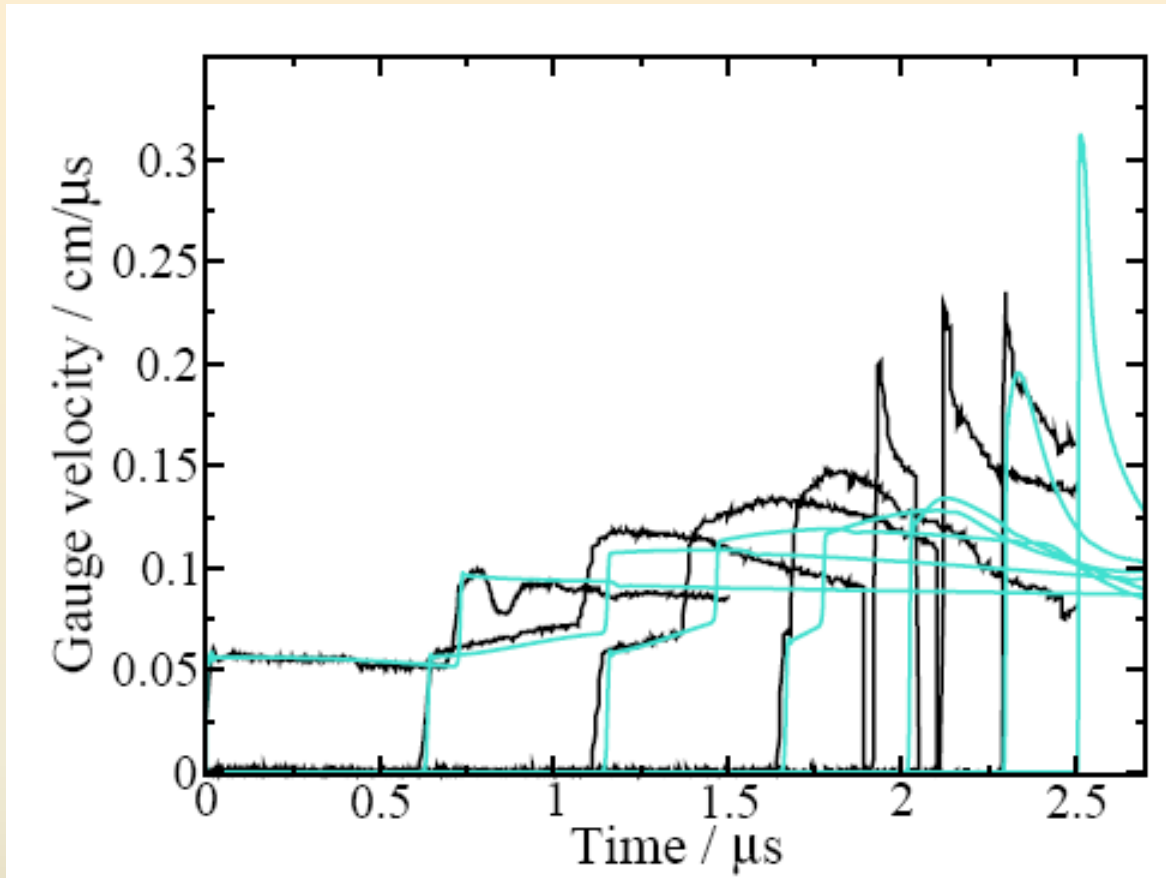


FIGURE 9. Fit to shot 1194/5 (light green traces) using CREST. Experimental (black traces) input pressures 3.93GPa and 8.58GPa. Fit to shot 1281/2 (not shown) is not dissimilar to this.

13.The CREST Reactive-Burn Model, C.A. Handley, UK

研究の歴史と動向

第14回デトネーションシンポジウム(2010)

初期状態に依存しないモデルの構築

Shock Desensitization in Explosives: An Exploration of Two Competing Hypotheses Hugh James & Brian Lambourn – AWE.

CRESTは反応モデルや状態方程式のパラメータを変化させることなく、複数の衝撃起爆問題に適用できる。

Modelling Detonation Propagation and Failure in PBX 9502 Using CREST Nicholas Whitworth & Caroline Handley – AWE.

CRESTの重要な特徴は初期温度や初期密度が異なっても状態式や反応モデルの係数を修正することなく適用できることである。

研究動向のまとめ

初期温度や初期密度が異なっても状態式や反応モデルの係数を修正することなく適用できるモデルの構築。

マクロ - メソ - ミクロスケールの融合

状態方程式の重要性

高エネルギー物質の起爆現象のモデル化に関する研究

反応流れシミュレーションに対する
我々の研究展開

反応流れシミュレーションに必要な研究開発項目

- | | |
|---------------------------|-------------|
| 0) 数値流体力学 (CFD) コード | 各項目は、未解決の |
| 1) 起爆モデル | 問題を含んだ研究課題！ |
| 2) 未反応成分の状態方程式 | |
| 3) 完全反応成分 (爆轟生成ガス) の状態方程式 | |
| 4) 混合則 | |

パラメータは実験的に求められる。

問題点と研究動向

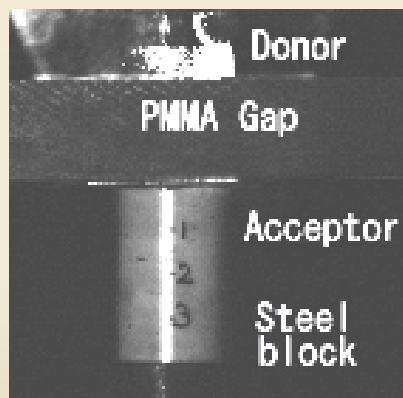
初期密度が変わっただけで新たにパラメータを求める必要がある。初期条件に依存しない起爆モデルの構築について研究が進められている。

ギャップ試験を応用した反応流れシミュレーション

単一物質で初期密度も同一条件

状態式と起爆モデルのパラメータを変えることなく

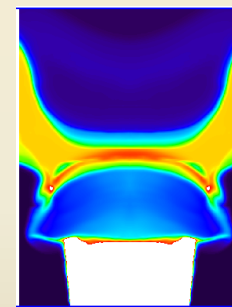
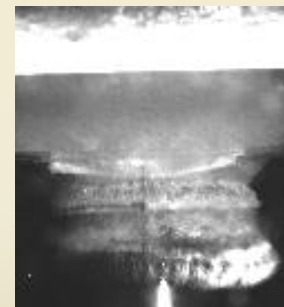
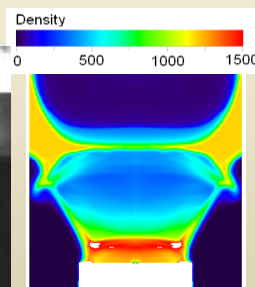
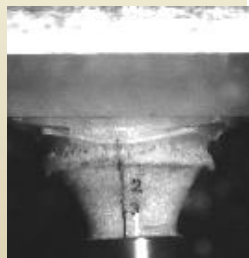
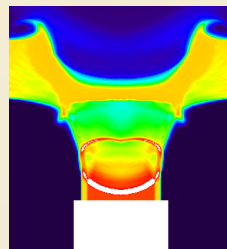
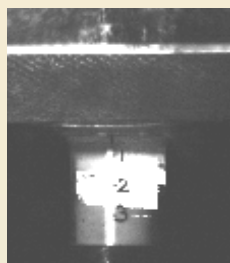
爆轟に至る条件、至らない条件、判断が困難な条件を再現可能



Go



NoGo



Marginal

- 研究の目標 -

単一のパラメータセットで初期条件の違いまで表現できるシミュレーション手法を開発する。



物理的に妥当な起爆モデルの構築

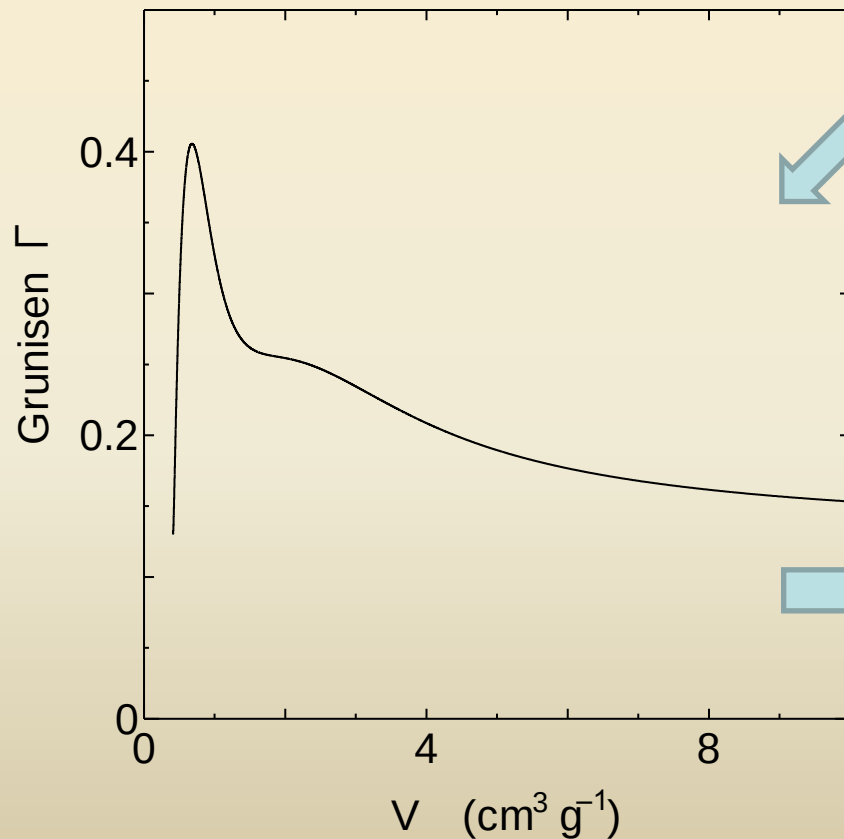
起爆モデルのみならず状態式の初期密度依存をセットで議論する必要がある。

統一型状態方程式を用いたシミュレーション
 独特の方法でPETN爆轟ガスのグリユナイゼン係数を
 比体積の関数として求める。

仮定

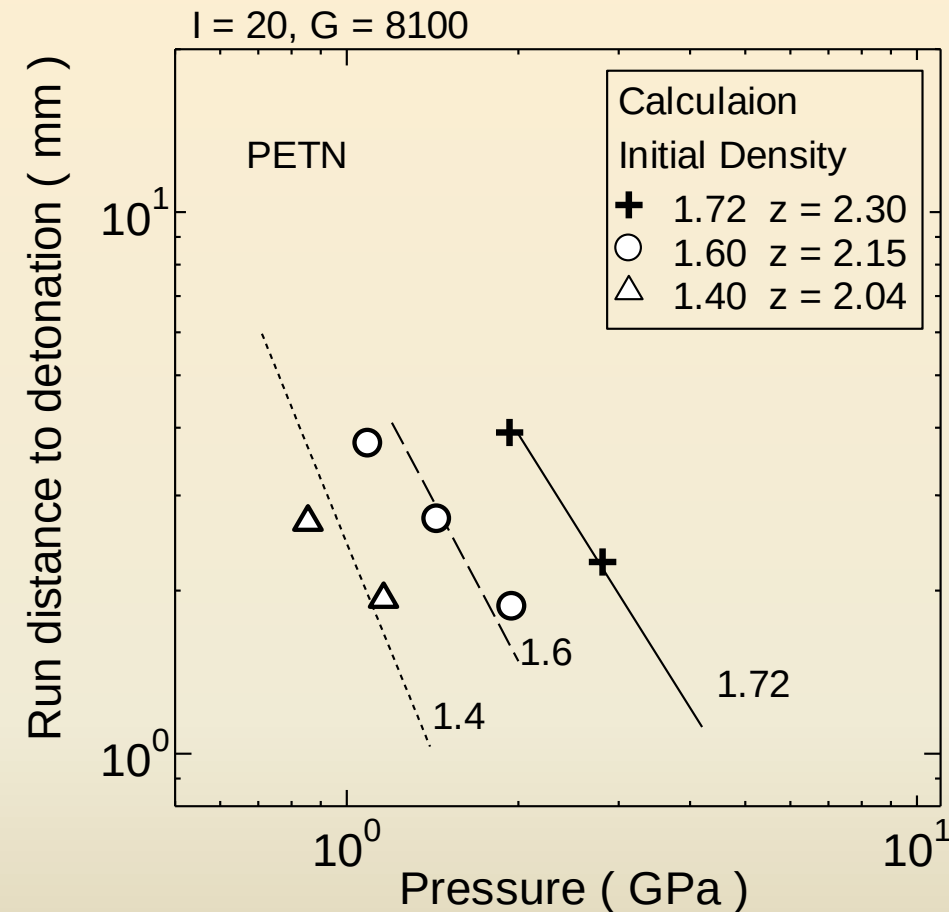
真密度の状態式情報は既知
 初期密度と爆轟速度も既知

K. Nagayama and S. Kubota, J. Appl.
 Phys., 93, 2583(2003)



$$P = \frac{\Gamma(v)}{v} (\varepsilon - \varepsilon_i^{TMD}) + P_i^{TMD} .$$

統一型状態方程式を用いたシミュレーション



$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1-\lambda)^{2/9}\eta^4 + G(1-\lambda)^{2/9}\lambda^{2/3}P^z$$

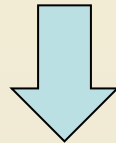
$$z = a + b \exp(\rho_0/c)$$

統一型の状態方程式を用いて唯一のパラメータセットで任意の初期密度に対して反応流シミュレーションを可能にした。

S. Kubota, K. Nagayama, Yuji Wada, and Yuji Ogata, STEM, 71, 91(2010)

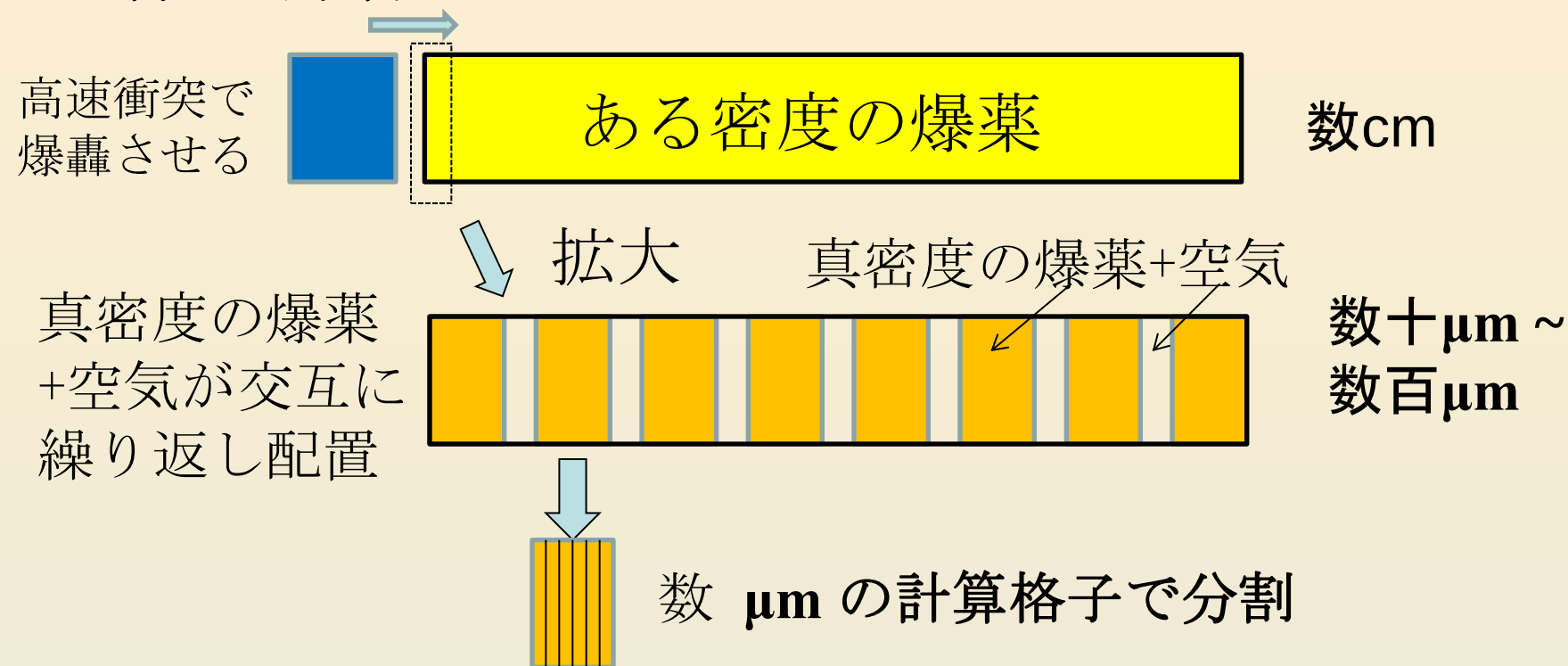
初期密度と爆轟速度の関係も使わない

真密度の高エネルギー物質の状態式のパラメータは既知とし、**任意の初期密度に対する状態式情報を数値シミュレーションで得る。**



任意の初期状態に適用できる状態式を作る。

背景 爆轟シミュレーション (プレート・ギャップモデル)



前提； 真密度の状態式情報はすべて既知

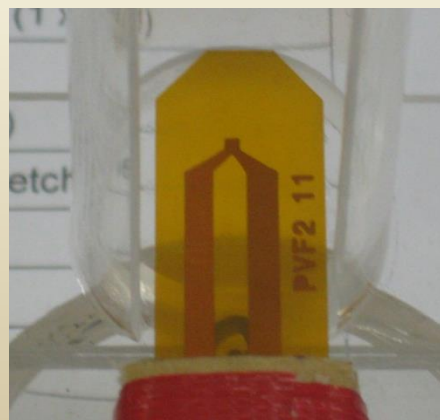
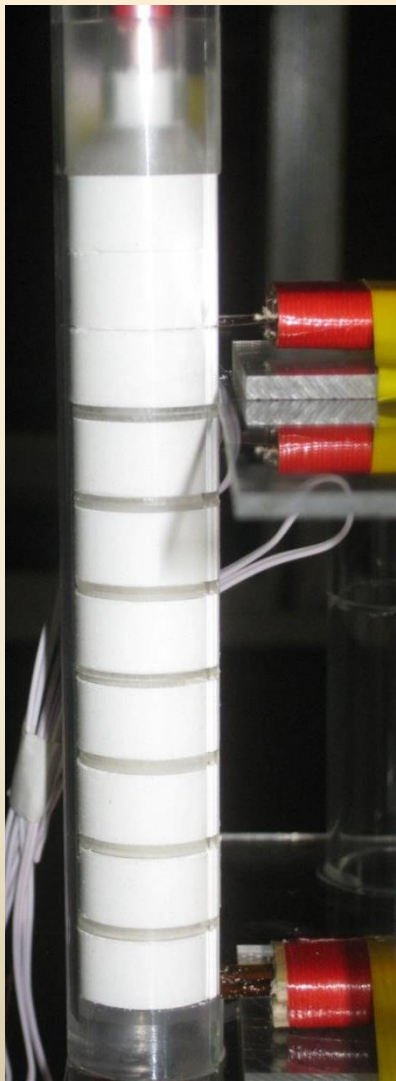
(起爆モデル、未反応成分状態式、**爆轟ガス状態式**)

初期密度は空隙と爆薬のサイズを変化させ調整

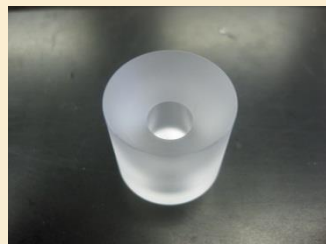
爆轟速度をモニターし定常爆轟に到達した点で状態量を抽出する。

数値解析モデルの妥当性検証実験

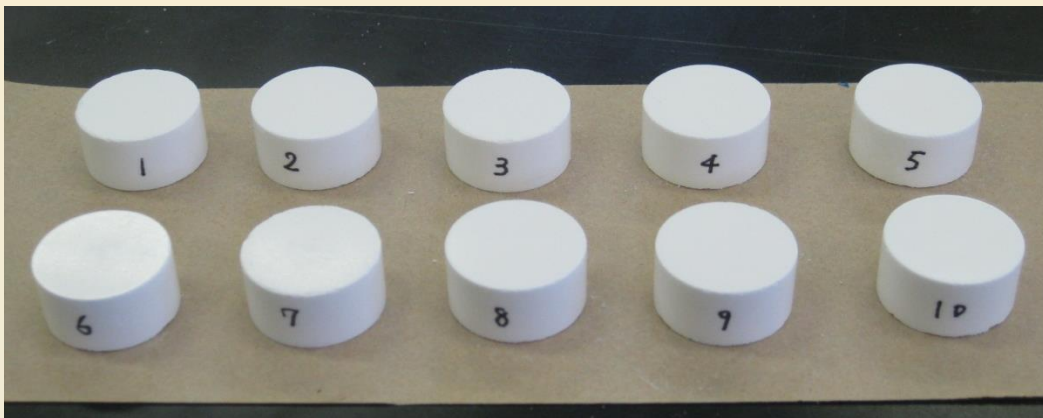
圧力ゲージを用いて爆轟速度を精密に測定
爆轟波の到達時刻 2点間の距離



ブースター部、主爆薬（ペレット）、空隙



ブースター部
C4 爆薬2g

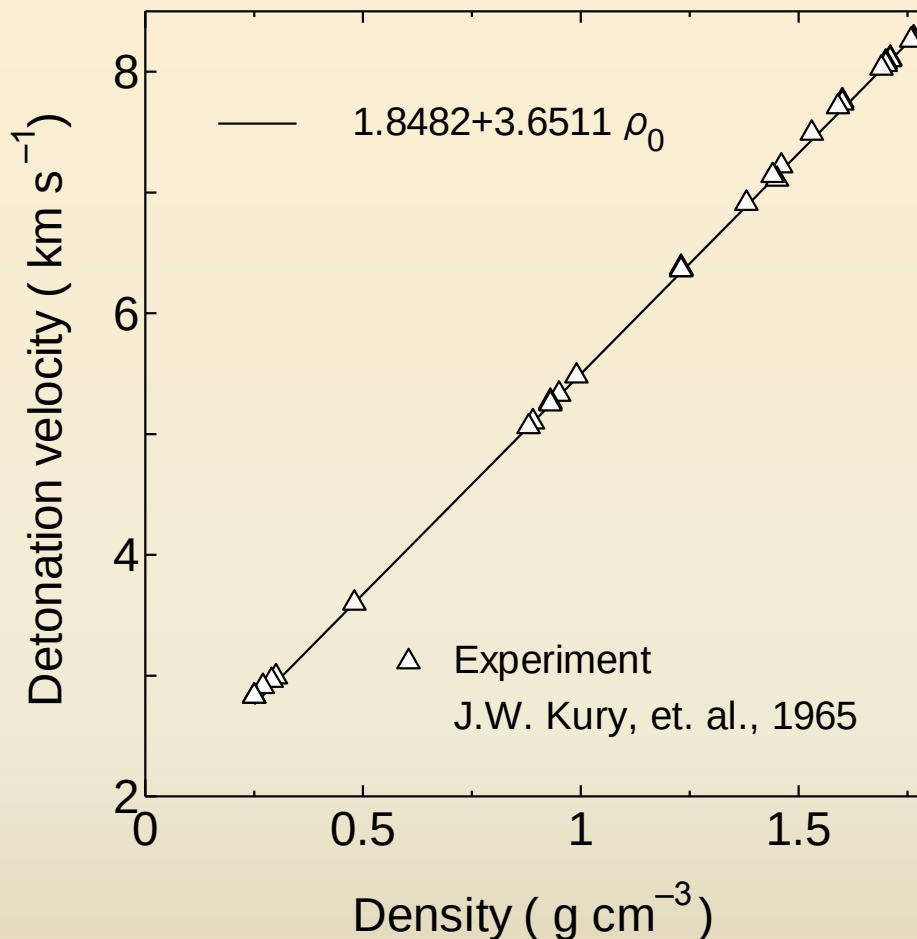


主爆薬
C-A5 爆薬
ペレット
($\phi 20 \times 10\text{mm}$)



空隙用
アクリルリング
0.5～4 mm

高性能爆薬の初期密度と爆轟速度との関係



$$D[\rho_0] = j + k\rho_0$$

Linear relationship between detonation velocity and initial density (PETN)

試料 (Composition A5)

日本工機製 **Composition A5** RDX 98.8%

RDXの性質をかなり反映していると考えられる。

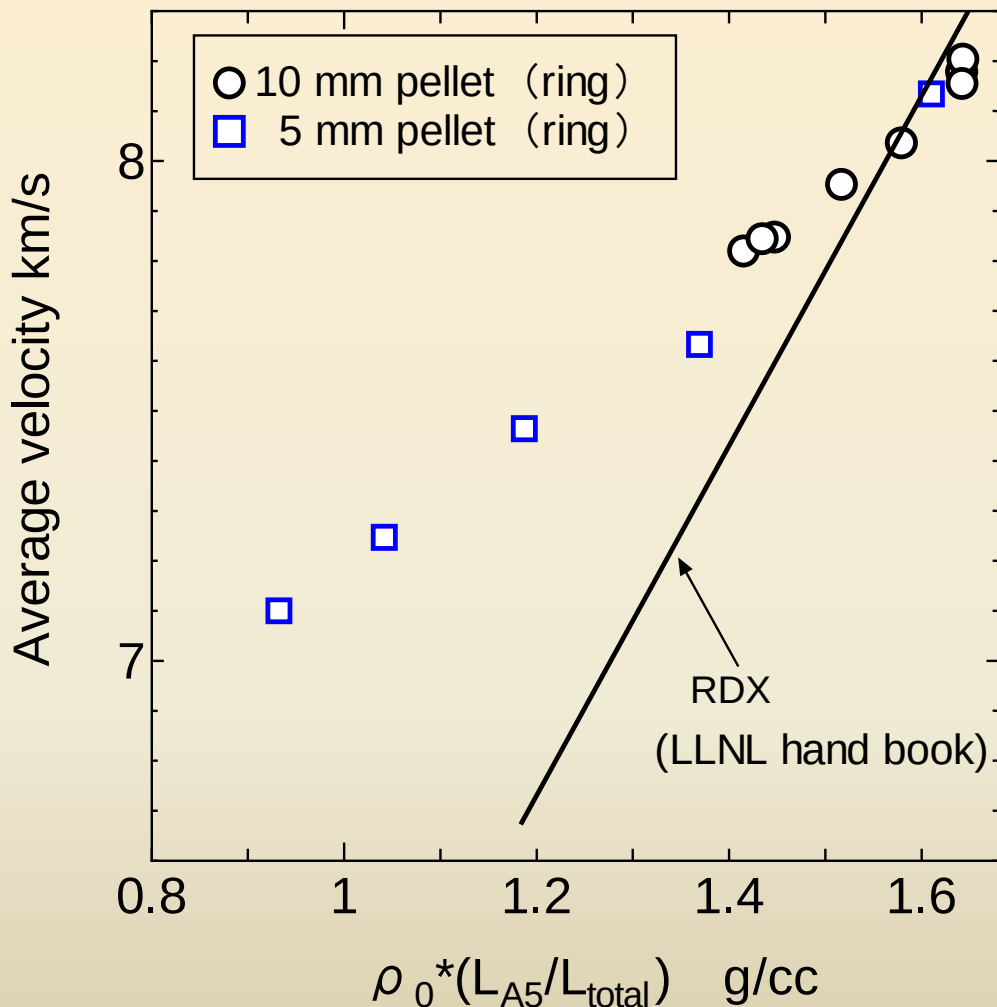
LLNLのハンドブック

初期密度と爆轟速度の間には線形関係がある。

見かけの密度

ペレット密度×ペレット厚さ/全体の厚さ

平均速度 (PMMAリングを用いた場合)



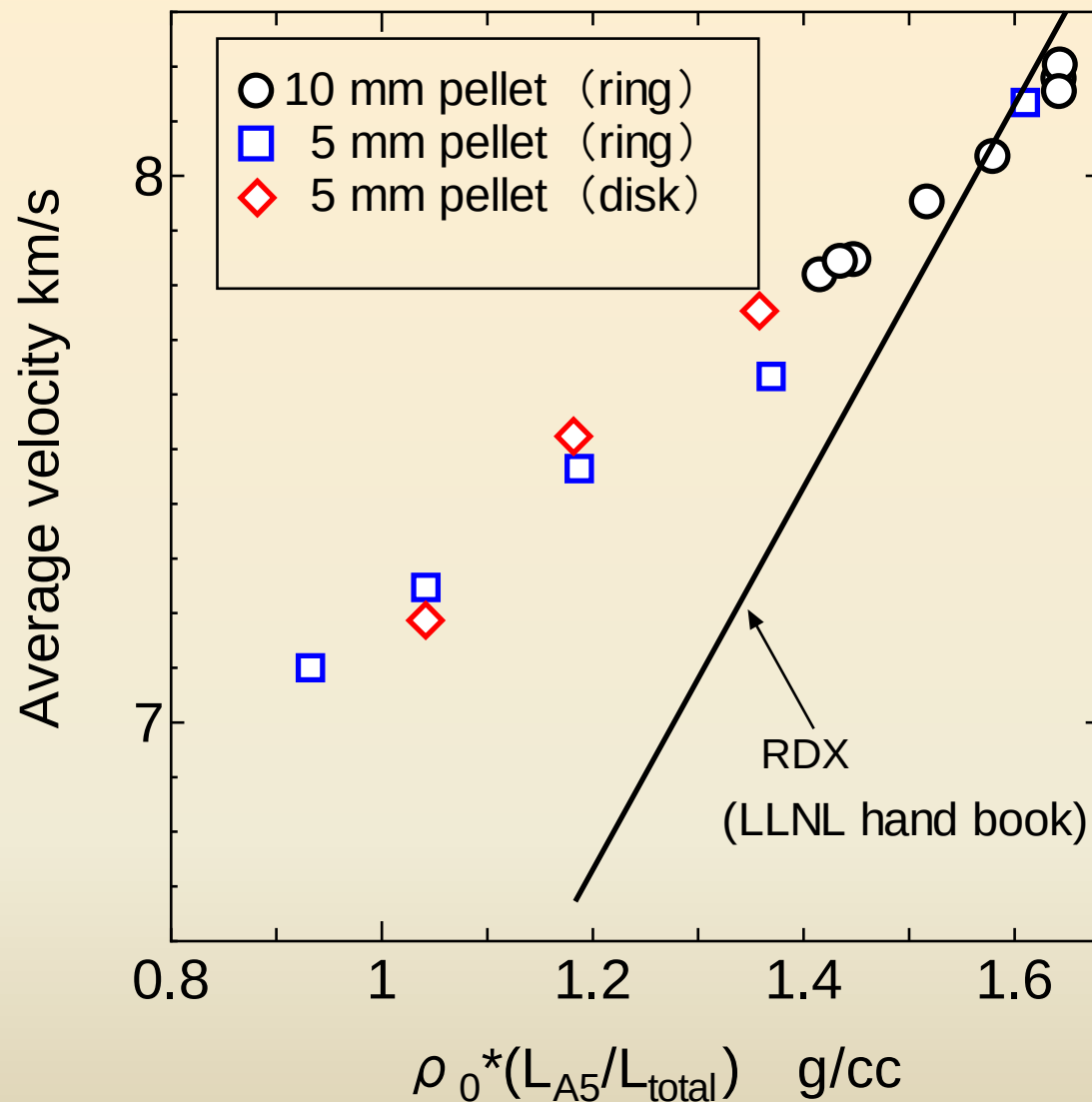
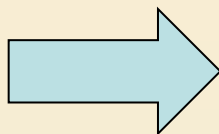
ギャップ材：
PMMAリング

横 軸
見かけの密度
ペレット密度
 $\times$ ペレット厚さ/全体の厚さ

リングの代わりに
PMMAディスク

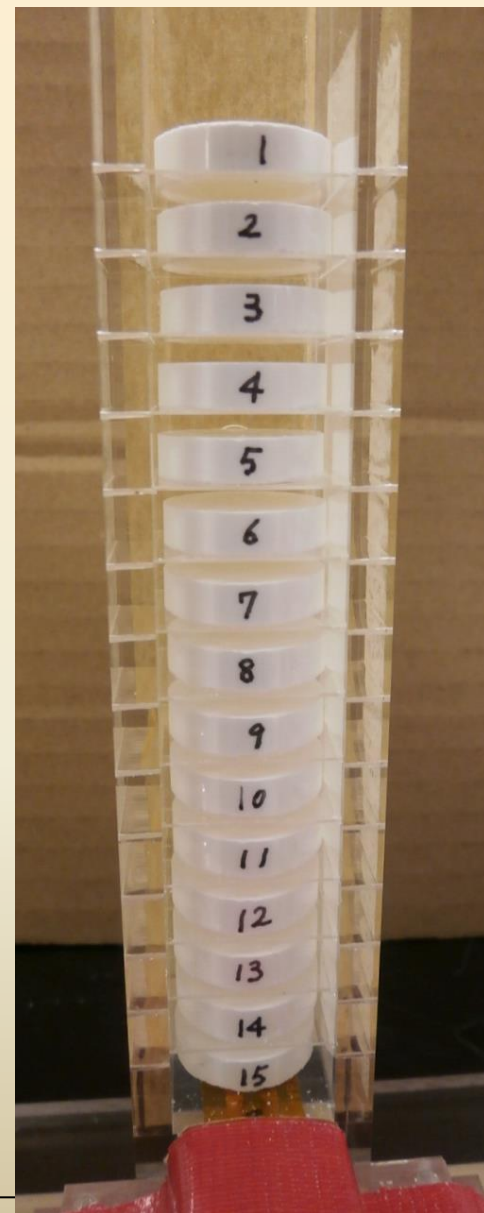
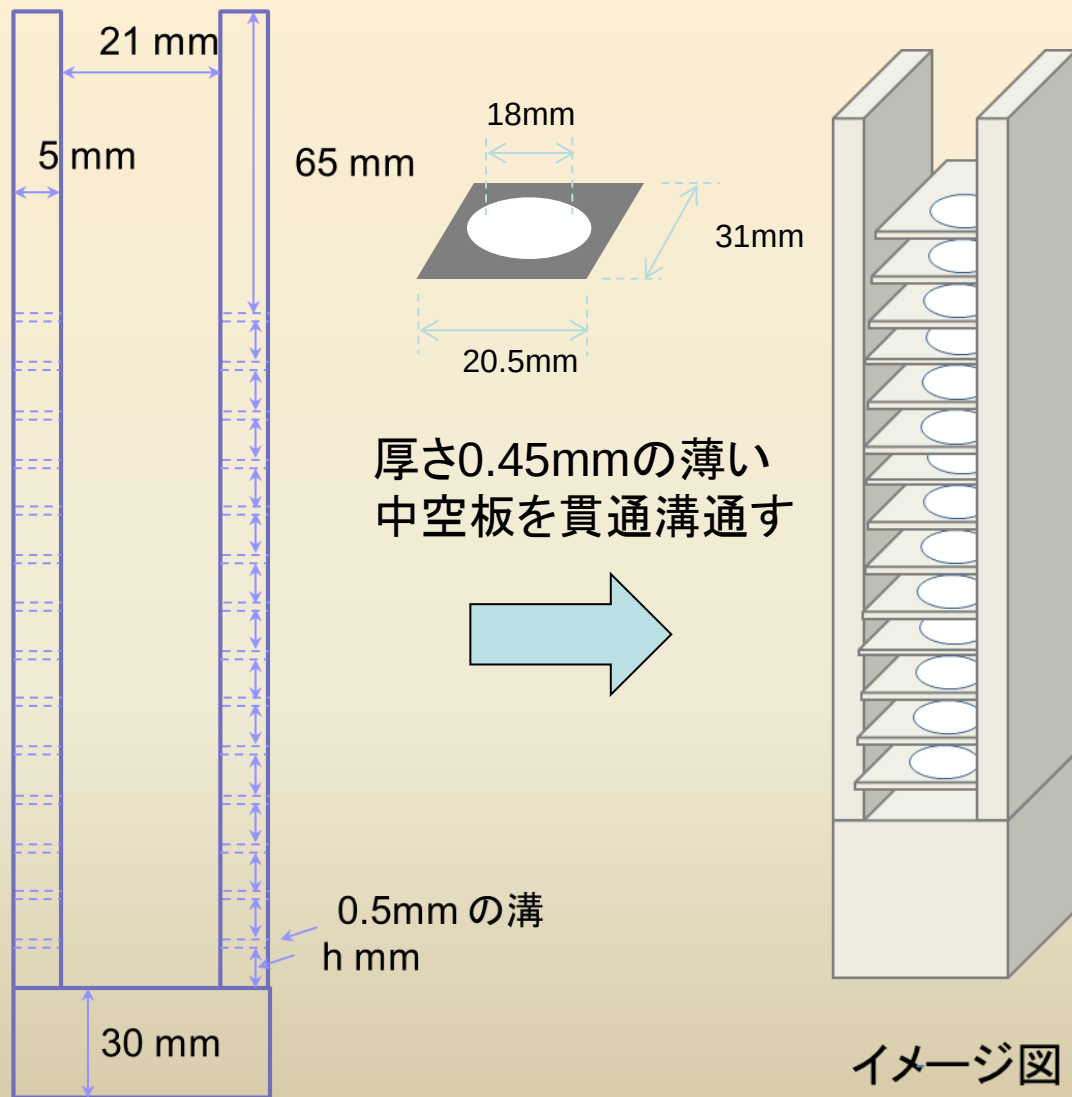
計測結果の検討

リングの代わりに
PMMAディスク

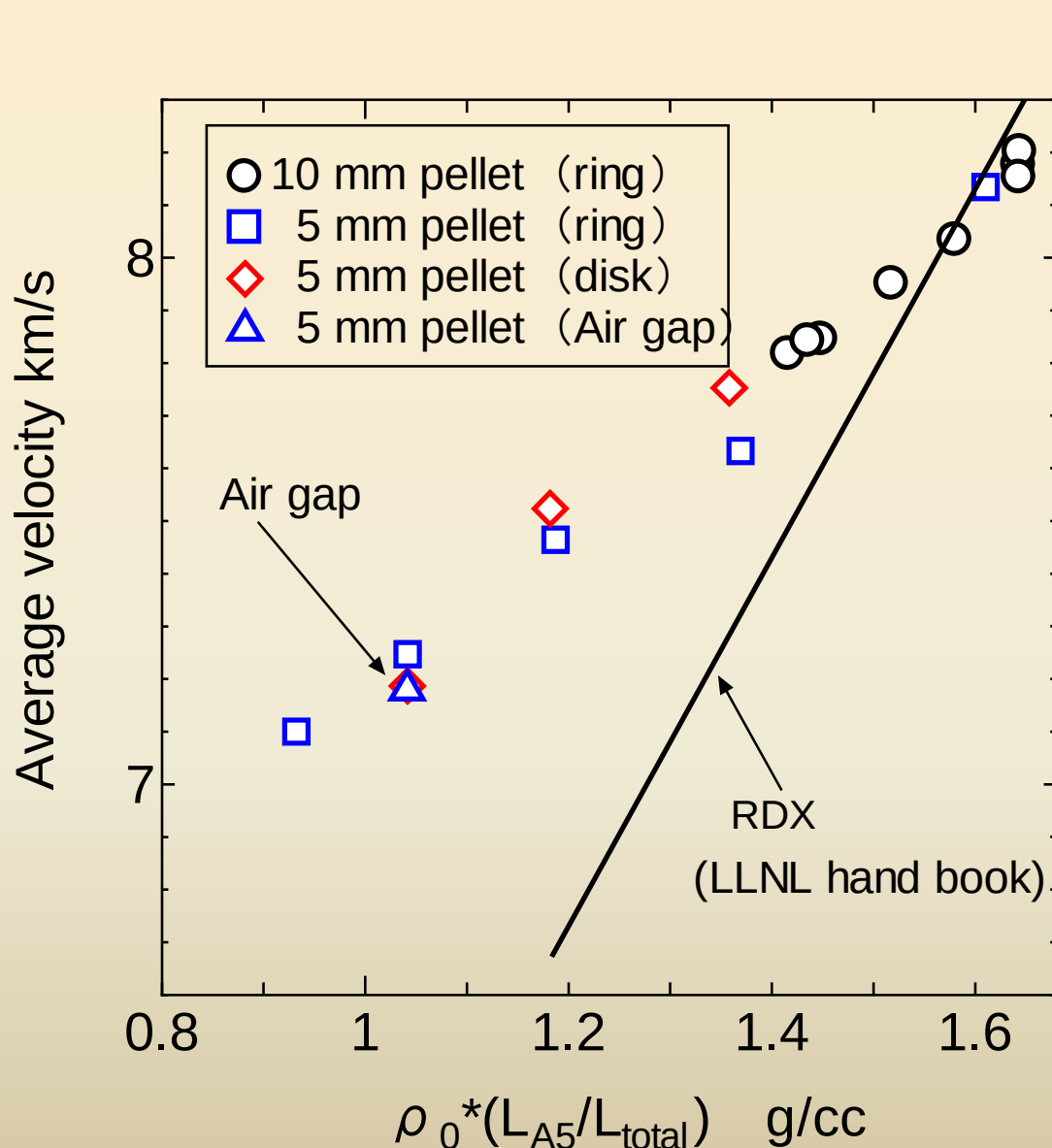


PMMAリングではない空隙の模擬が必要！

PMMAリングを使用しない空隙の模擬



実験結果 (PMMAリングを使用しない空隙の模擬)



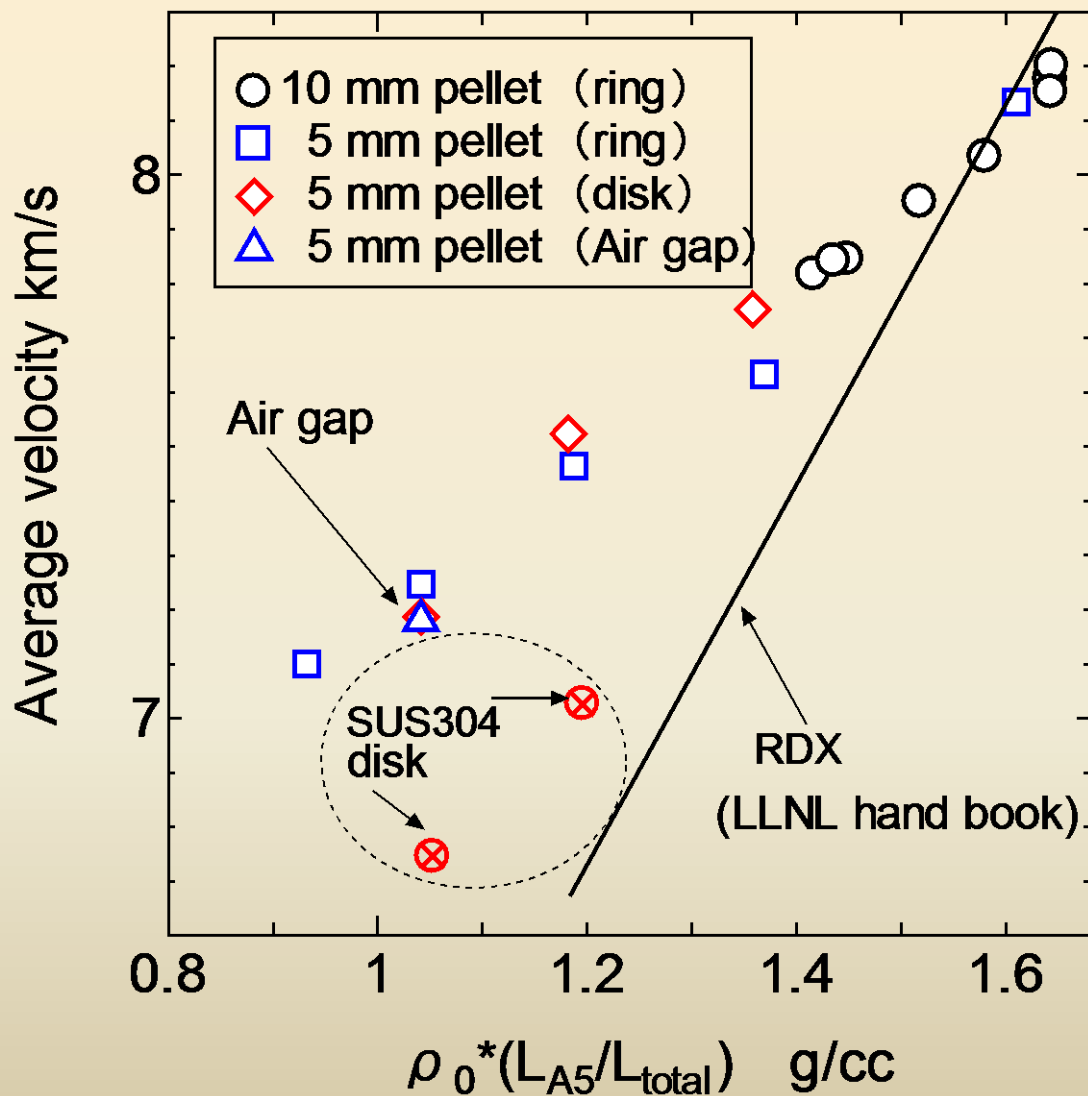
ギャップ材
PMMAリング
PMMAディスク
空気
がすべて一致

リングで空隙は再現
していた。

初期密度と爆轟速度
との関係から外れる
理由？

高インピーダンスの
物質をギャップ材とす
れば違いが明確になる

実験結果 (SUS304ディスクを追加)



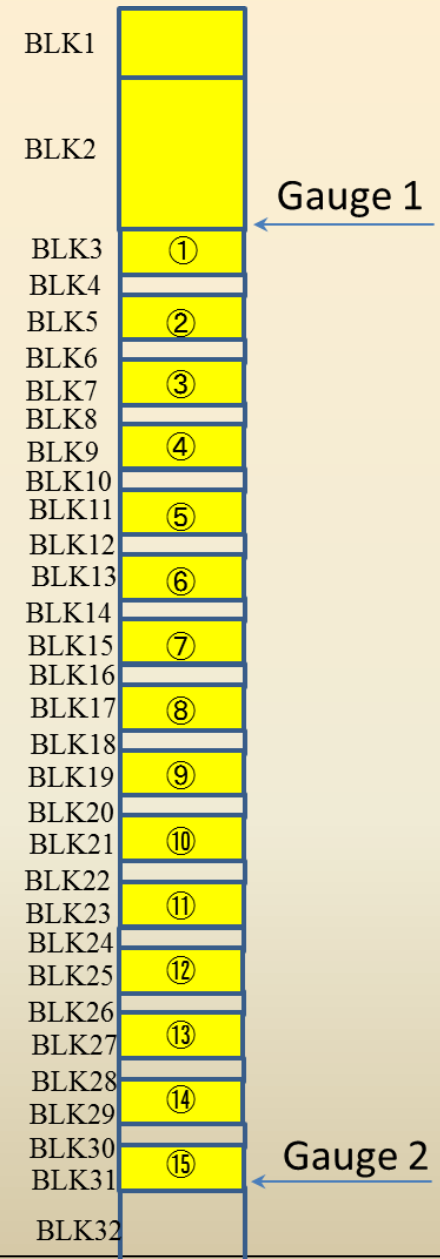
ギャップ材として
SUS304を使用した。
高い衝撃インピーダンス
を持っているので高圧力
が発生する。
(見かけの密度でSUS304
の密度は考慮しない)

益々、実験結果の説明が
必要である。

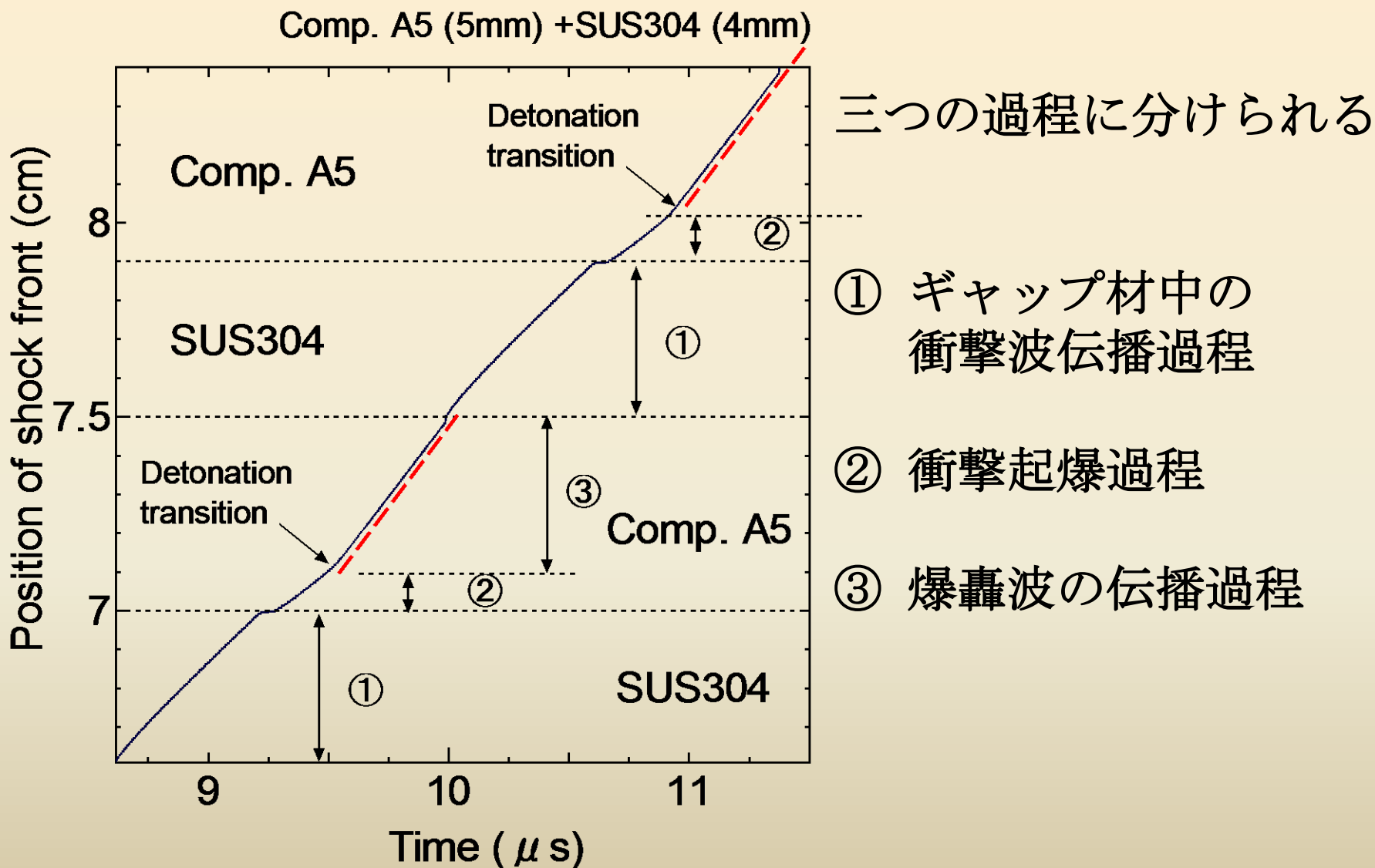
数値シミュレーションに
頼ることにする。

数値シミュレーションによる検討

- ・ギャップ材はSUS304とする。
- ・1次元Lagrange系のコードを使用する。
- ・起爆計算を実施する。
(パラメータは敏感に設定)



数値シミュレーションによる実験の説明



結論：試料の衝撃圧縮特性が既知であれば極短い爆轟誘導距離を求める手法として閉じる。新しい実験の提案

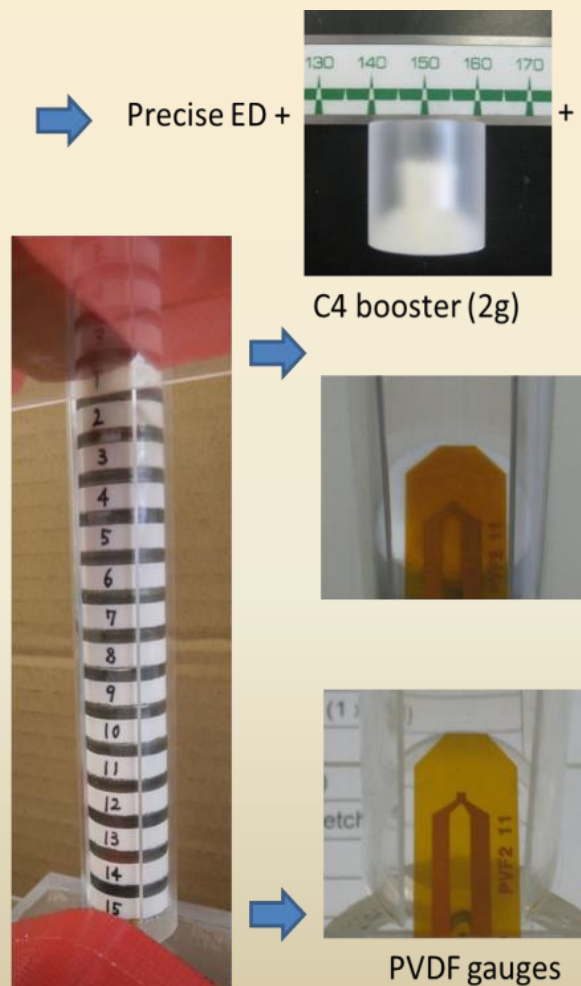
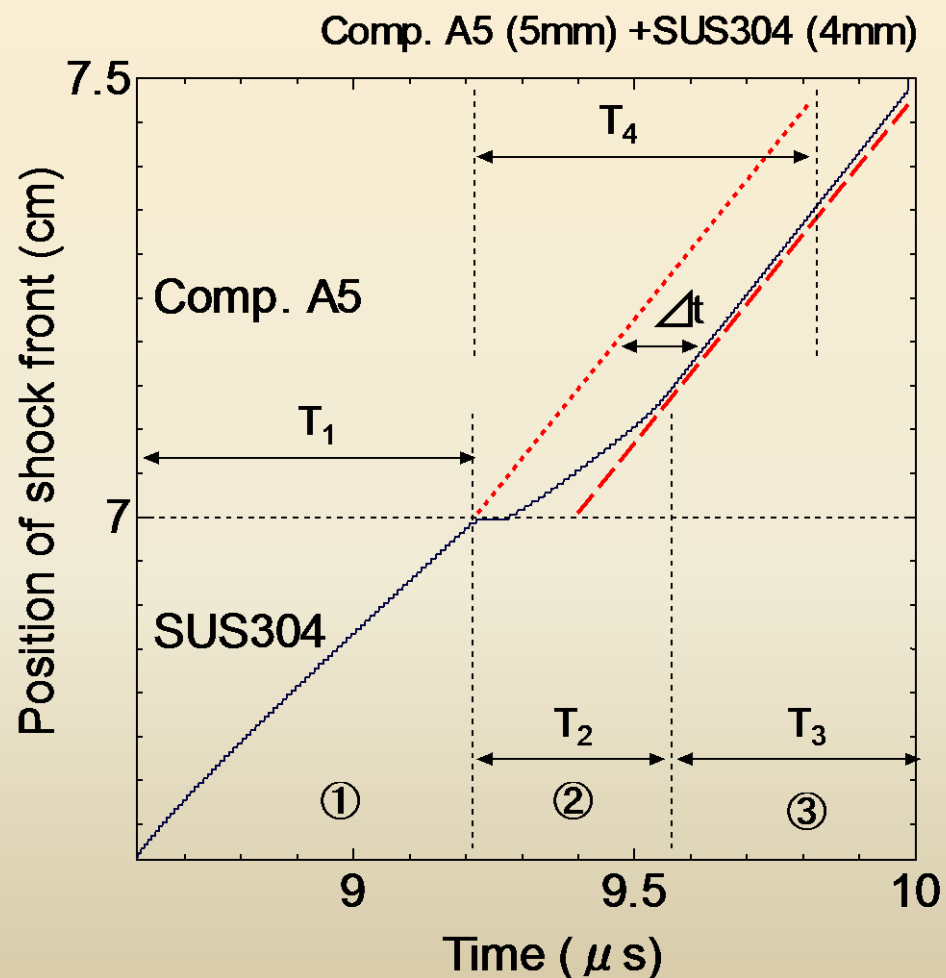
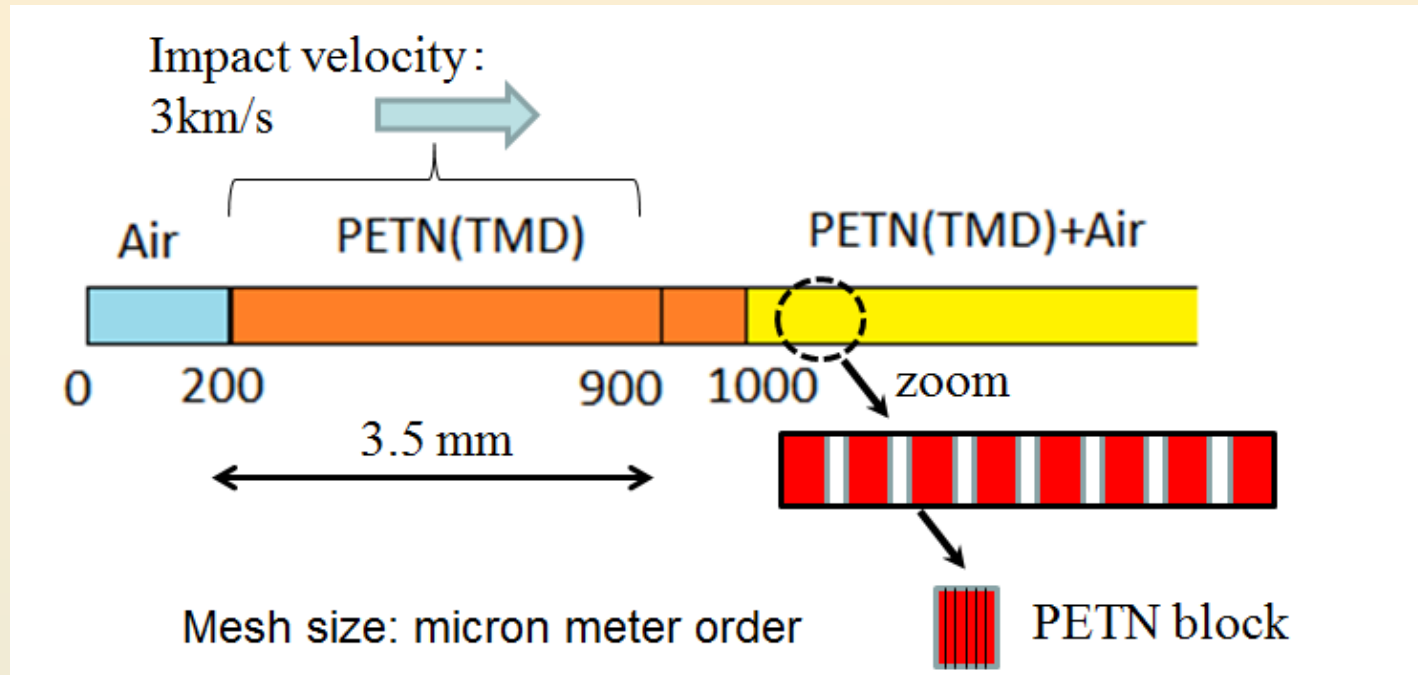


Plate gap model (one dimensional reactive flow simulation)



Mesh size 5 μm

PETN : 7 mesh/block

Air : 3 mesh/block

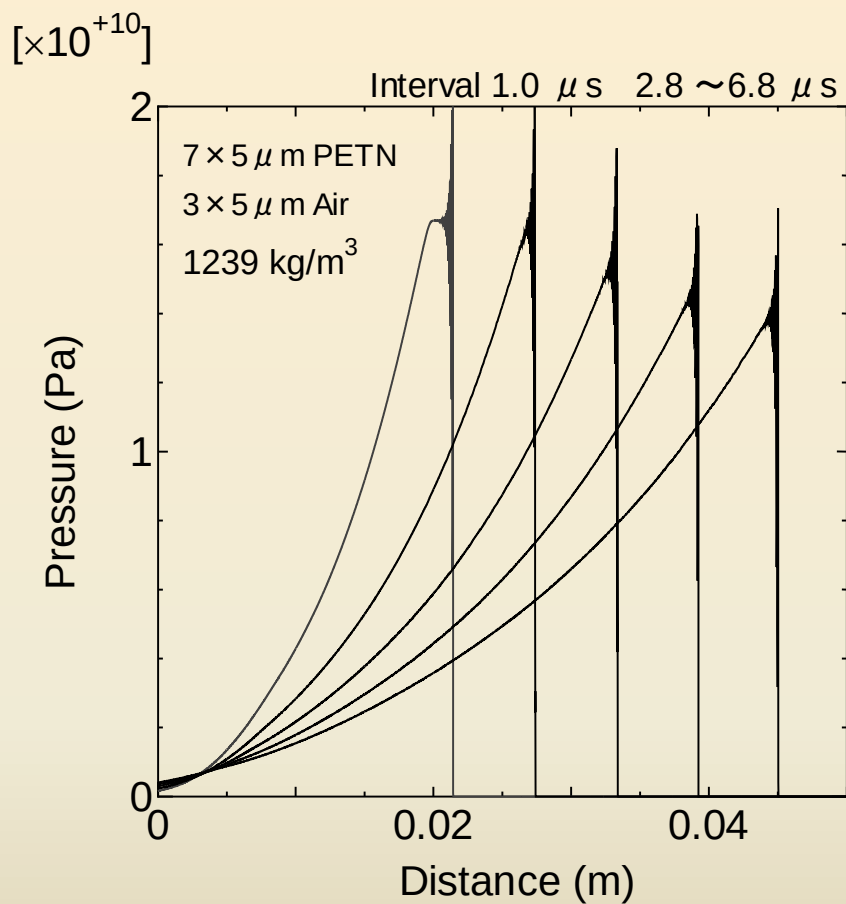


bulk density

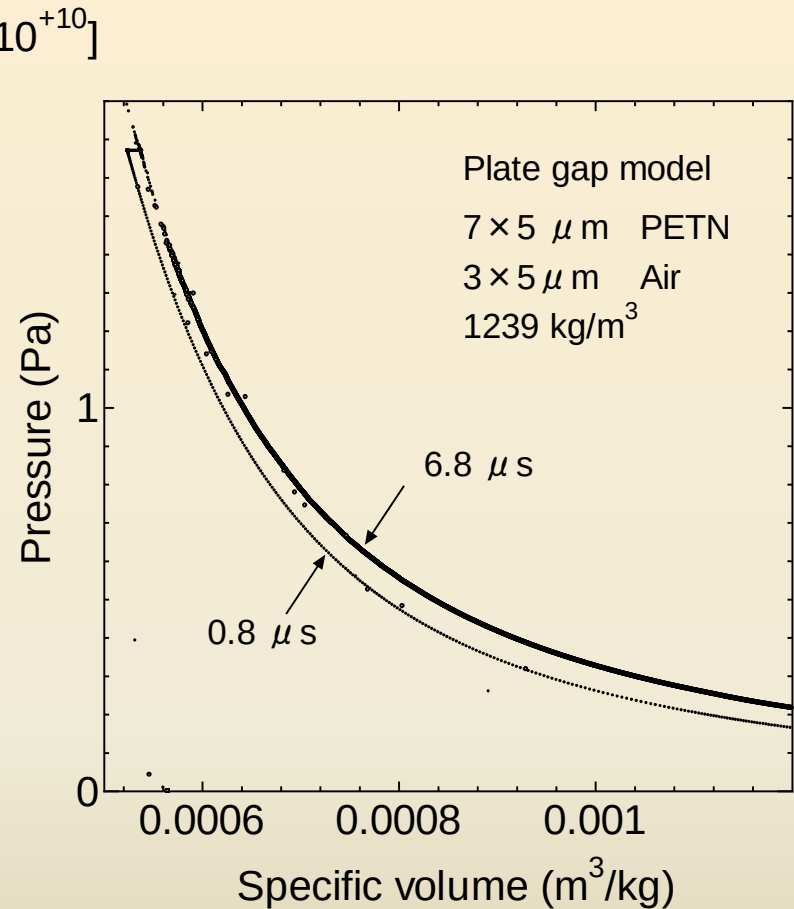
1239 kg/m^3

(TMD:1770 kg/m^3)

爆轟シミュレーション結果 (プレート・ギャップモデル)



シミュレーション結果



状態量の抽出

Summary

