

高性能爆薬の一次元衝撃起爆過程の数値解析

久保田士郎*, 島田英樹*, 松井紀久男*, 永山邦仁**

一次元衝撃起爆実験が数値解析により再現された。数値解析により得られた爆薬中の衝撃波の軌跡をもとに、実験と同じ手順で固体爆薬の Hugoniot を求めた。その結果得られた Hugoniot は衝撃波一粒子速度面にて実験データと良い一致を示した。さらに、数値解析により Single curve buildup について検討した。その結果、後方の反応波の影響を先頭衝撃波が顕著に受ける場合は、爆薬中先頭衝撃波のたどる軌跡は唯一ではないことが確認された。

1. はじめに

爆薬の衝撃起爆過程を数値解析するとき、必要不可欠なのは、反応速度則ならびに反応が始まってから完全に反応が終了するまでの状態(反応相)の評価である。その状態量評価のためによく採用されるのは、爆薬の反応途中の状態を完全反応成分(爆轟生成ガス)と未反応成分の混合相として取り扱う方法である¹⁾。この場合、爆轟生成ガスと未反応成分の状態式が既知であれば、それらの状態式を用いて反応相の圧力を求めることができる。したがって、少なくとも両成分ともに信頼できる状態式が得られていない場合、仮に化学物理の原理に基づいた理論的起爆モデルが提案されたとしても、定量的な信頼性の確認は困難なものになることが予想される。

爆轟生成ガスの状態式は、爆薬の組成に基づく状態式、KHT²⁾⁻⁴⁾、BKW⁵⁾⁶⁾、LJD⁷⁾、あるいはモデル実験により状態式のパラメータを得るJWL状態式⁸⁾⁻¹⁰⁾等数多く提案され、かつ、その信頼性の議論は数多くなされている。一方、未反応成分については一次元衝撃起爆実験(以下 Wedge test)¹¹⁾¹²⁾をもとにして得られる Hugoniot を凝縮系物質の状態式を構成するために使用されるのと同じように Mie-Gruneisen 状態式

の参照状態線として用いたり、JWL型のフィット式にて関数近似したりすることにより状態式が構成されている。1965年 Wedge test により得られる情報は完全に未反応なものではないことが Ramsay と Poplate¹³⁾により指摘され、多くの研究者に支持された。さらに彼らは、衝撃波速度一粒子速度面で体積弾性波速度とスパイク点を結ぶ直線により未反応爆薬の Hugoniot が表現できる可能性を示した。Mader⁷⁾は Wedge test により得られる状態線を固体爆薬の Reactive Hugoniot と称し、その情報を反応速度則のパラメータを決定するために使用した。そして、未反応成分の Hugoniot を nonreactive Hugoniot と称して、反応領域圧力評価にはその Hugoniot を基にした Mie-Gruneisen 型の状態式を用いた。反応状態を完全反応成分と未反応成分の混合相として考える場合、反応相圧力評価のためには完全に未反応な状態が要求される。したがって、上述した Ramsay らの考えを支持すれば、Mader のような方法が正しいと言える。しかしながら、真に未反応な状態線を予測することは非常に困難なため、上述のように Wedge test により得られる Hugoniot が未反応成分の状態式に参照されることが多いものと考えられる。著者らが問題として考えているのは、現状の工学的に有効な起爆モデルを論ずる研究論文でさえも、上述した状態式に関する問題を議論していない点である。同じ Ignition & Growth¹⁴⁾モデルに関連する研究においても、たとえば Lee と Tarver による初期の論文で用いられている爆薬の Hugoniot は Mader の文献に見られるいわゆる nonreactive Hugoniot に非常に近いものであり、後の Tarver¹⁵⁾や Murphy¹⁶⁾の論文では Wedge test により得られた Reactive Hugoniot が使用されている。Wedge test にて得られている情報が Ramsay らに

2001年12月3日受付

2002年1月17日受理

*九州大学大学院 工学研究院 地球資源システム工学部門

〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1

TEL 092-642-3626

FAX 092-642-3614

E-mail kubota@mine.kyushu-u.ac.jp

**九州大学大学院 工学研究院 航空宇宙工学部門

〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1

TEL 092-642-3804

FAX 092-642-4143

E-mail nagayama@aero.kyushu-u.ac.jp

より予想されたようなものであるか否か、あるいは真に未反応な状態が評価可能である場合に、その Hugoniot を用いた起爆計算は reactive Hugoniot を用いたものとの程度違う結果を与えるのか、検討しなければならないことは数多く残されている。

本報告では、未反応爆薬の状態式として Lee と Tarver による初期の論文¹⁴⁾で用いられている Hugoniot を使用して、Wedge test を再現する数値計算を行う。すなわち、一次元衝撃起爆問題を Lagrange コードにて解くことにより爆薬中を伝播する衝撃波の軌跡を求める。求められた軌跡をもとに、実験で評価する方法と同じ手順で爆薬への入射圧力を評価し衝撃起爆誘導距離と入射圧力の関係を得る。起爆モデルのパラメータを調整することにより衝撃起爆誘導距離と入射圧力の関係を実験データと一致させ Wedge test を数値解析的に再現する。その数値解析結果をもとに固体爆薬の Hugoniot をもとめ、実験的に得られる Hugoniot と比較検討する。さらに数値解析結果をもとに Single curve buildup¹⁷⁾についても検討する。

2. 一次元衝撃起爆実験とその数値解析

2.1 Wedge test

Wedge test はくさび形の試料爆薬に一次元的衝撃荷重を作用させ、試料爆薬の自由面を伝播する衝撃波の軌跡をストリーク撮影する実験であり、爆薬中を伝播する衝撃波速度が得られる。衝撃荷重源には爆薬レンズにより平面起爆される主爆薬が用いられ、平面的な衝撃荷重が主爆薬の下にセットされたディスク状の不活性物質(Attenuator)に伝えられる。くさび形の試料爆薬は主爆薬とは反対の面に取り付けられる。試料爆薬への入射圧力を求めるために、Attenuator には Hugoniot 特性が既知のものが使用され、あらかじめ起爆実験を行う前に、Attenuator の自由面速度が計測される。自由面近似にて粒子速度を求め、圧力(P) - 粒子速度(Up)面に Attenuator の膨張特性曲線を引く。P-Up 面にて膨張曲線と Rayleigh 線の交点が爆薬への入射圧力に相当し、Hugoniot 上の一点が求められる。

2.2 数値解析

Wedge test はその結果に対して、一次元的なデータ解析が適用できるように設計された実験であるために、そこで起こる現象を数値解析により再現するには、一次元衝突問題を解けば十分である。本研究では Mader の SIN コード¹⁸⁾を参考にして作成した Lagrange 系の一次元有限差分コードにより数

値解析を行った。PETN(初期密度 $1.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)を計算の対象とし、計算において圧力が十分に持続するように厚い PMMA(2cm)に初期速度を与えて初期条件とした。PMMA の初期速度を変化させることで爆薬への入射圧力を調整した。爆薬の未反応成分、ならびに爆轟生成ガスの状態方程式としては JWL 状態式を採用し、そのパラメータは Lee と Tarver の文献¹⁴⁾の値を用いた。PMMA は Hugoniot を参照状態線とした Mie-Gruneisen 型の状態方程式を用いた。起爆モデルは Ignition & Growth モデル(2項モデル)とし、パラメータは数値解析結果が実験で得られる衝撃起爆誘導距離と入射圧力の関係(Pop plot)⁷⁾¹³⁾を再現できるように試行錯誤的に求めた。パラメータの決定方法の詳細については参考文献(19)を、数値解析手法の詳細は文献(19)(20)を参照されたい。空間刻みは 0.02 mm とした。

3. 結果と考察

3.1 数値解析結果による Hugoniot 評価

Fig. 1 は数値解析により得られた爆薬中を伝播する衝撃波の時間 - 距離線図を示す。図中○印は SDT (Shock to detonation transition) 点に対応しており、爆薬と PMMA の初期界面から SDT 点までの距離が衝撃起爆誘導距離となる。高密度の爆薬の場合、実験で得られるストリーク写真にて次のことが確認されている。SDT 点までの衝撃波の軌跡は直線的である。さらに、ストリーク写真から得られた衝撃波の軌跡より、出発点の傾きを用いて初期の衝撃波速度を精度よく決定することは一般的に困難である。以上のことから、爆薬へ入射する圧力を評価するためには、時間 -

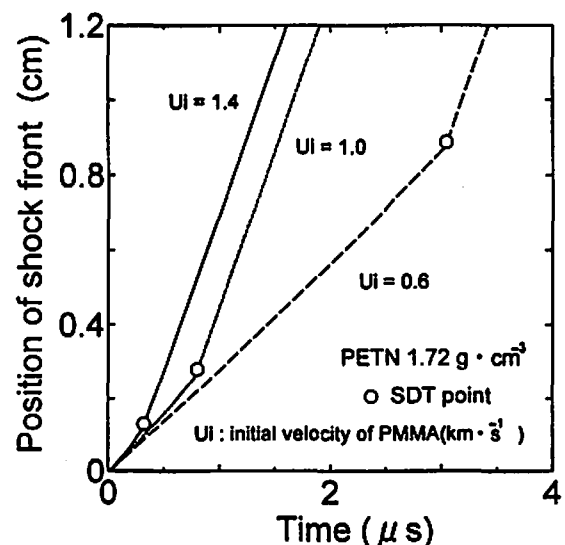


Fig. 1 Relationship between position of shock front and time in PETN ($1.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

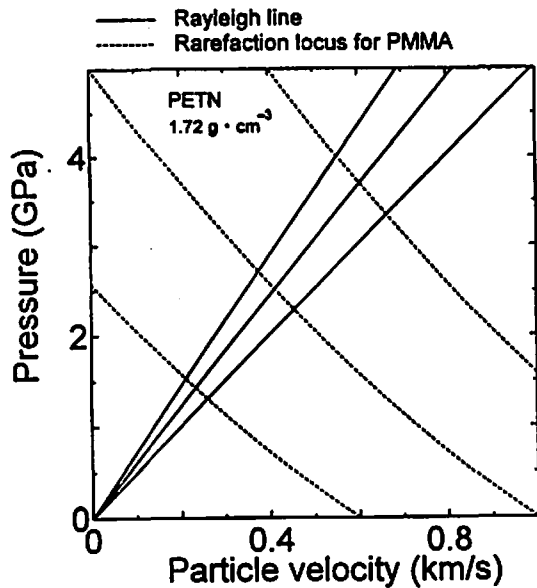


Fig. 2 Pressure and particle velocity plane to estimate entrance pressure to PETN $1.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

距離線図において出発点と SDT 点から得られる平均的な衝撃波速度を用いる方が現実的であると考える。本研究では数値解析結果による実験の再現を試みるために、平均的な衝撃波速度で爆薬への入射圧力を決定する。Fig. 2 は時間-距離線図を用いて得られた Rayleigh 線と PMMA の膨張曲線を圧力-粒子速度面に示したものである。PMMA の Hugoniot のパラメータは Stirpe ら²¹⁾が実験データを整理するために用いたものと同じものとし、膨張曲線は Hugoniot の Mirror 曲線とした。Rayleigh 線は傾きの小さいものから順に PMMA の初期速度が $0.6, 1.0, 1.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ の結果に対応し、膨張曲線との交点からそれぞれの圧力を見積もる。Fig. 1 ならびに Fig. 2 は上述した方法により得られる結果が、Pop plot を満足するように試行錯誤的に起爆モデルのパラメータを求めて得られた結果である。Fig. 3 に Stirpe らの行った Wedge test による実験データ²¹⁾、Cooper による実験データの近似直線²²⁾、数値計算結果をもとに得られた結果を示す。本数値解析に用いた未反応爆薬の Hugoniot が真に未反応なものであれば、今、Pop plot を再現できる起爆モデルのパラメータが得られているから、本数値解析結果から得られる結果は実験を精度よく再現できる可能性が高い。Fig. 4 に Los Alamos Scientific Laboratory (LASL)²³⁾の Hugoniot データと本数値解析結果をもとに得られた Hugoniot を示す。初期密度が $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ の PETN についても同様な手順で Hugoniot を求めた。数値解析結果から評価された Hugoniot は実験データのばらつきの中に入ってお

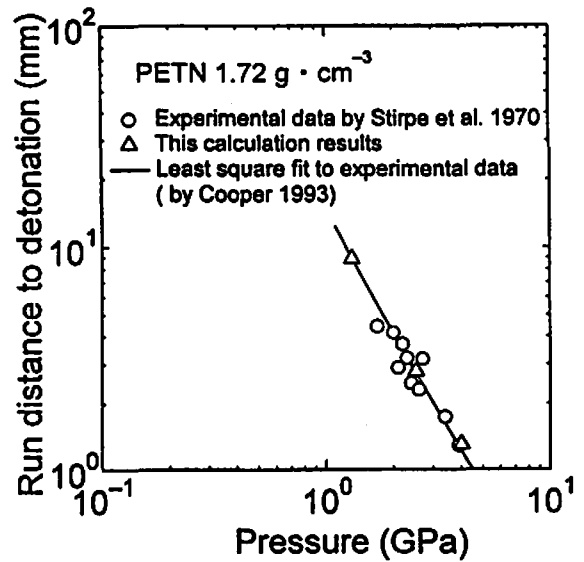


Fig. 3 Pop plot for PETN $1.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

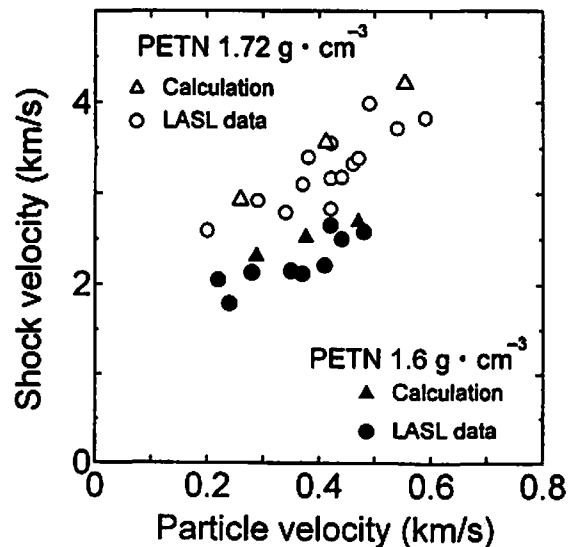


Fig. 4 Comparison of LASL data and this calculation on PETN Hugoniot

り、すべて衝撃波速度が速い方に位置する実験データとよい一致を示している。数値解析では同じ荷重条件であれば、爆轟に至るまでの反応率の変化は一通り決まってしまうのに対して、実験では同じ荷重条件を設定したとしても、反応率の変化に統計的な要素が含まれてくる。数値解析が反応率の統計的なデータのばらつきまで考慮していないために常に理想的に反応を起こした場合だけを評価していると考えると以下のように考察できる。実験データのうち衝撃波が速いほうにばらついているデータは理想的な反応経路を通った結果に対応し、衝撃波速度がより低くなるほうに位置するデータは理想的な場合よりも反応率の低い経路をたどった結果に対応する。衝撃波速度-粒子速度面に

て $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ の C-J 点は計算結果から得られた Hugoniot の延長線上にあることが確認されたが、 $1.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ の C-J 点は Hugoniot の延長線上には確認されなかった。この結果から考えて、Wedge test から得られるデータをもとに、衝撃波速度-粒子速度面において固体爆薬の Hugoniot を一次式にて近似する場合、C-J 点やスパイク点のような高压側の正確な情報を得ることが困難であると考えられる。高压側の正確な Hugoniot を得るためには最近検討されているように爆薬を気孔物質と考えて²⁴⁾ Wedge test の結果を再吟味することが重要となると考えている。

3. 2 Single curve buildup

Single curve buildup の概念は Lindstorm により提唱され¹⁷⁾⁷⁾、半経験的な起爆モデルである Forest Fire モデル²⁵⁾²⁶⁾にも取り入れたられた。後に実験的に衝撃波先頭の後方より、反応波が成長して、先頭の圧力よりもはるかに高い波頭圧力を持った反応波が先頭衝撃波を追い越す現象が確認され、Single curve buildup の概念は否定された²⁷⁾²⁸⁾。ここでは数値解析結果をもとに Single curve buildup について検討する。距離-時間線図において定常爆轟の始まりの点(SDT点)は、同時に爆薬中の shock buildup の終点になる。爆薬中の衝撃波の出発点から SDT 点までの軌跡を buildup curve とすれば、SDT 点を原点として buildup curve を整理すると Fig. 5 のようになる。同図は本数値解析で得られた結果であり、3通りの入射圧力(圧力値の評価は3.1節と同様)についての buildup curve を示

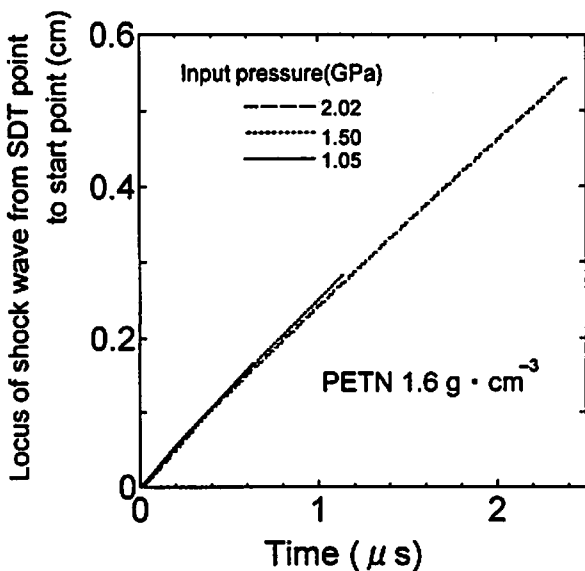


Fig. 5 Locus of shock wave from SDT point to start point (SDT point is (0, 0), end point of each line is start point)

している。Lindstorm は入射圧力の異なる5通りの Wedge test の結果を Fig. 5 と同じように整理して、buildup curve は爆薬への入射圧力には依存せず、唯一の軌跡をたどると考えた。すなわち、「反応波は、伝播距離、時間および状態量に関して唯一の軌跡をたどり爆轟波に成長する」との仮定が Single curve buildup である。Fig. 5 に示した数値解析結果から考えると、異なる入射圧力に対して buildup curve は一致しないといえるが、同時に顕著な違いが出ていないと見ることも出来る。Fig. 6 は入射圧力が 1.05 GPa ならびに 2.02 GPa の場合について、SDT 点到達前の衝撃波伝播過程を説明するために、SDT 点を原点と

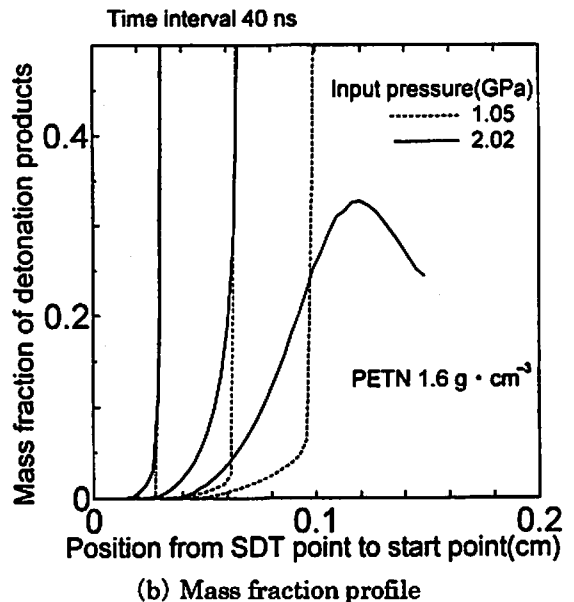
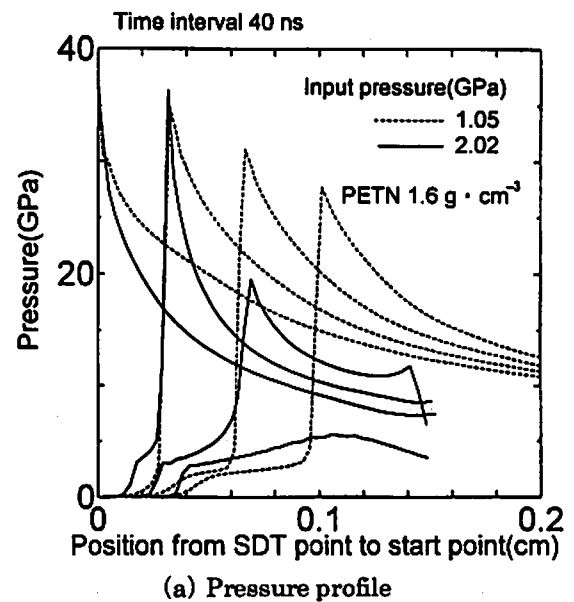


Fig. 6 Propagation process of shock wave with reaction in PETN $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ before steady detonation (Origin of x axis is SDT point)

して、そこから40ns間隔でさかのぼって圧力ならびに爆薬の反応率(爆轟生成ガスの質量分率, 1が完全反応)の分布を示している。ただし、反応率については反応の始まりを強調したために、質量分率0.5までを縦軸とした。Single curve buildupが成立しない理由はFig. 6をもとに考えるとより理解しやすい。入射圧力の違いにより衝撃波先頭の圧力ならびに反応率にも違いが確認されることからSingle curve buildupの概念は成立していない。注意しなければならないのは、Fig. 6で考えた時間スケールである。入射圧力2.02GPaの場合をみると、衝撃波の後方から高い圧力を伴って追いかけてくる反応波は約120nsで瞬時に先頭に追いついてしまう。したがってこの間の反応速度の違いによるFig. 5への影響は非常に小さいことが理解できる。さらに前の時間にさかもどれば、爆薬の反応が先頭衝撃波に与える影響は非常に小さくなることが予想され、その結果、Fig. 5に示す3通りのbuildup curveに顕著な違いが見られないと考えられる。Fig. 6にて確認されたことをより正確に表現すると「後方の反応波の影響を先頭衝撃波が顕著に受ける場合は先頭衝撃波がたどる軌跡は唯一ではない。」となる。今考えているbuildup curveが一致するか否かの議論を実験結果から行うためには実験精度が非常に重要となると考えられ、現状のWedge testの実験精度を上げる工夫が必要不可欠になると考えられる。

4. まとめ

一次元衝撃起爆問題をLagrangeコードにて数値解析した。数値解析により衝撃波の軌跡を求め、その結果得られる爆薬のHugoniotと実験的に得られるHugoniotと比較検討した。衝撃波速度-粒子速度面にて数値解析結果をもとに得られたHugoniotは実験データのばらつきの範囲に入っており、すべて衝撃波速度が速い方に位置する実験データとよい一致を示した。数値解析によりSingle curve buildupについて検討した結果、後方の反応波が先頭衝撃波に追いついた後では、反応波のたどる軌跡は唯一ではないことが確認された。

文 献

- 1) J. N. Johnson, P. K. Tang and C. A. Forest, *J. Appl. Phys.* 57, 4323 (1985)
- 2) 木原太郎, 疋田強, *工業火薬協会誌*, 13, 46 (1952)
- 3) 田中克己, 「爆薬の爆轟特性解析」, (1983), 化学技術研究所
- 4) K. Tanaka, *Proc. 8th Symposium (International)*

- on Detonation, pp548-557 (1985)
- 5) R. D. Cowan and W. Fickett, *J. Chem. Phys.*, 24, 932 (1956)
- 6) C. L. Mader, LASL report, LA-3704 (1967)
- 7) C. L. Mader, "Numerical Modeling of Detonations", (1979), University of California Press
- 8) J. W. Kury, H. C. Hornig, E. L. Lee, J. L. McDonnell, D. L. Ornellas, M. Finger, F. M. Strange and M. L. Wilkins, *Proc. 4th Symposium (International) on Detonation*, pp3-13 (1965)
- 9) E. Lee, M. Finger, W. Collins, LLNL report, UCID-16189 (1973)
- 10) H. Hornberg and F. Volk, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 14, 199 (1989)
- 11) A. W. Campbell, W. C. Davis, J. B. Ramsay and J. R. Travis, *Phys. Fluids*, 4, 511 (1961)
- 12) G. E. Seay and L. B. Seely, *J. Appl. Phys.*, 32, 1092 (1961)
- 13) J. B. Ramsay and A. Popolato, *Proc. 4th Symposium (International) on Detonation*, pp233 (1965)
- 14) E. L. Lee and C. M. Tarver, *Phys. Fluids*, 23, 2362 (1980)
- 15) C. M. Tarver and J. O. Hallquist, *Proc. 7th Symposium (International) on Detonation*, pp488-497 (1981)
- 16) M. J. Murphy, E. L. Lee, A. M. Weston and A. E. Williams, *Proc. 10th Symposium (International) on Detonation*, pp963-970 (1993)
- 17) I. E. Lindstrom, *J. Appl. Phys.*, 37, 4873 (1966)
- 18) C. L. Mader and W. R. Gage, LASL report, LA-3720 (1967)
- 19) 久保田士郎, 島田英樹, 松井紀久男, 加藤幸夫, 高橋勝彦, 吉田正典, 劉志躍, 伊東繁, *火薬学会誌*, 62, 57 (2001)
- 20) 久保田士郎, 島田英樹, 松井紀久男, 永山邦仁, *火薬学会誌*, 62, 155 (2001)
- 21) D. Stirpe, J. O. Johnson and J. Wackerle, *J. Appl. Phys.*, 41, 3884 (1970)
- 22) P. W. Cooper, *Proc. 10th Symposium (International) on Detonation*, pp690-695 (1993)
- 23) S. P. Marsh, "LASL Shock Hugoniot data" (1980) University of California Press
- 24) L. Davison, Y. Horie and M. Shahinpoor, "High-Pressure Shock Compression of Solids IV", chapter 2 (1997)

- 25) C. A. Forest, LASL report, LA-7245 (1978)
26) C. L. Mader and C. A. Forest, LASL report, LA-6259 (1976)
27) I. E. Lindstrom, J. Appl. Phys., 41, 337 (1970)

- 28) J. Wackerle, J. O. Johnson and P. M. Halleck, Proc. 6th Symposium (International) on Detonation, pp20-28 (1976)

Numerical simulation on 1 dim. shock initiation of high explosive

Shiro KUBOTA*, Hideki SHIMADA*, Kikuo MATSUI*,
and Kunihito NAGAYAMA**

One dimensional shock initiation experiments are reproduced by numerical simulation. The loci of shock wave in explosive obtained by numerical simulation are used to estimate the Hugoniot for high explosive with the same procedure for the experiment. As a result, Hugoniot obtained by this simulation well agrees with the experimental data. Moreover, concept of single curve buildup is investigated numerically. The results indicate that when the shock front is remarkably affected by a reaction wave before the shock front, the locus of the shock front in the high explosive does not pass unique line.

(*Department of Earth Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, 6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581, JAPAN

**Department of Aeronautics and Astronautics, Graduate school of engineering, Kyushu University, 6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581, JAPAN)