

線爆発によって起爆されたPETN粉体爆薬の爆ごうを利用した対象物の指向性制御に関する研究

大塚誠彦^{*†}, 飛田栄治^{**}, 黒木賢二^{**}, Mhamed Souli^{***}, 伊東 繁^{****}

^{*}熊本大学大学院 自然科学研究科 博士後期課程 〒860-8555 熊本県熊本市黒髪2-39-1

[†]Corresponding address: masahiko@shock.smrc.kumamoto-u.ac.jp

^{**}旭化成ケミカルズ株式会社 化薬事業部 大分工場 技術開発室 〒870-0392 大分県大分市大字里2620番地

^{***}Universite des Sciences et Technologies de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq, Lille, FRANCE

^{****}熊本大学 衝撃・極限環境研究センター 〒860-8555 熊本県熊本市黒髪2-39-1

2006年8月21日 受付 2006年9月22日 受理

要旨

金属細線爆発を利用した爆薬の起爆方法は、平面起爆、線起爆など多様な起爆への応用が可能である。本研究では、金属細線を銅パイプの中心軸上もしくは中心軸からある程度偏心させた軸上に配置し、銅パイプに充填されたPETN粉体爆薬を銅細線爆発によって瞬時起爆することで、爆薬が対象物へ及ぼす影響及び対象物の指向性について実験及び数値解析を行った。

PETNの薬厚によって発生する爆ごう圧力と爆ごうガスの量に変化するため、銅パイプの拡張に違いが生じた。銅パイプの初期拡張速度は爆ごうするPETNの薬厚と比例関係を示し、PETNの爆ごうエネルギーが銅パイプに作用した際に発生する反射波が拡張の収束速度に影響すると考察された。

1. 緒言

近年、爆薬が発生する高エネルギーを有効利用するための研究が盛んにおこなわれており、それには起爆方法、新規高性能爆薬の開発、爆ごう波や衝撃波の制御の検討などが挙げられる。本研究では、爆薬の起爆方法として、衝撃大電流を用いた金属細線爆発による爆薬起爆法に着目した。金属細線爆発は、衝撃大電流が金属細線に印加されることによって金属細線が液化、気化、プラズマ化と相転移する現象であり、最近では、窒素などのガス雰囲気中で金属細線を爆発させることによるナノ材料の合成¹⁾や、金属細線爆発から発生した水中衝撃波を利用した有機高分子の分解による水質浄化²⁾、細菌の殺菌³⁾等多くの分野へ応用されている。金属細線爆発を利用した爆薬の起爆方法としては、爆薬表面に平行、等間隔に設置した金属細線を一斉爆発させることで収束衝撃波を発生させ、工業用ダイヤモンドを得るなど、主として大容量試料の衝撃圧縮処理技術が知られている⁴⁾。また金属細線を使用したメッシュや金属箔を衝撃大電流によって瞬時起爆する方法が爆薬を平面起爆する手段として用いられている⁵⁾。このように金属細線爆発は電気雷管による点起爆とは異なり、容易に平面

起爆、線起爆など多様な起爆が可能であり、本方法によって起爆された爆薬の爆ごうを制御することによって、金属管の衝撃成形や粉末粒子を強化材として金属管内部へ打ち込む複合材料開発技術⁶⁾などへの応用が考えられる。

本研究では、金属細線爆発によって瞬時起爆された爆薬が対象物へ及ぼす影響及び対象物の指向性について検討を行った。筆者らは銅パイプに充填されたpentaerythritol tetranitrate (PETN) 粉体爆薬を、銅パイプの中心軸上もしくは中心軸からある程度偏心させた軸上に金属細線を配置し、金属細線に衝撃大電流を印加した際に起爆されたPETNの爆ごう、銅パイプの膨張について調査した。実験的手法として光学写真観察実験をおこない、数値解析として汎用陽解法有限要素解析プログラムであるLS-DYNA3Dを使用し、実験結果と数値解析結果の比較を行った。

2. 実験方法

キャパシターバンクに蓄えられた電荷を瞬間的に放電させて金属細線爆発を行い、それによってPETN粉体爆薬の起爆を行った。PETN粉体爆薬は、外径25.4 mm、長さ100 mm、肉厚2 mmの銅パイプに充填密度約800 kg・m³で

充填された。この時、爆薬のC-J爆ごう速度は $4983 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ であり、C-J爆ごう圧力は 5.7 GPa である。爆薬を起爆するための金属細線の爆発力は、金属細線の電気抵抗率に依存する傾向があることが知られている⁷⁾。本研究では、金属細線として $\phi 0.5 \text{ mm}$ の銅細線を使用し、静電容量 $12.5 \mu\text{F}$ 、充電電圧 40 kV 、エネルギー 10 kJ のキャパシターバンクによって起爆した。キャパシターバンクの放電電流波形はロゴスキーコイル及び積分器により計測した。ロゴスキーコイルとは空芯環状体にコイルが巻かれ、環状体を貫く電流による磁束密度の変化が起電力として検出される。記録はオシロスコープ(LeCroy社製)によって行った。Fig. 1に光学写真観察実験を行った際の実験装置の概略図を示す。電極間の銅細線の長さが 140 mm ⁴⁾であるこの装置は、2枚の銅板(厚さ 2 mm)で細線を挟み込み、高電圧ケーブルとともに締結している。この接続部は絶縁体であるベークライト板(高さ 80 mm)の足によって支持している。銅細線をFig. 1の(a)のように中心軸上に配置したものと、(b)のようにパイプ膨張の指向性を確認するために軸中心から上側に

に 8 mm 偏らせ偏心状態で配置した2種類のサンプルを準備した。銅パイプの中央に幅 $15 \mu\text{m}$ のストリークスリットを設け、PETNの爆ごうによって膨張する銅パイプの膨張過程をストリーク撮影した。光学写真観察実験には高速度カメラIMACON468 (HADLAND PHOTONICS社製)を使用し、光源として閃光時間約 $300 \mu\text{s}$ のキセノンフラッシュライト(日進電子工業株式会社)を用いた。可視化方法にはシャドウグラフ法を採用した。

3. 数値解析方法

本研究で使用した数値解析モデルをFig. 2に示す。解析対象は円筒形状であるが、計算場縮小のために円筒の半分のみを作成し、数値解析を行った。本モデルは爆薬部、銅パイプ部、キャップ部、空気部の4部分から構成されており、爆薬部、銅パイプ部、キャップ部は実験における寸法と同じである。また銅パイプの変形過程を調査するために、パイプの外側には空気部を設けた。実験で偏心起爆は銅細線を中心軸から 8 mm 偏心させて配置したが、数値解析で

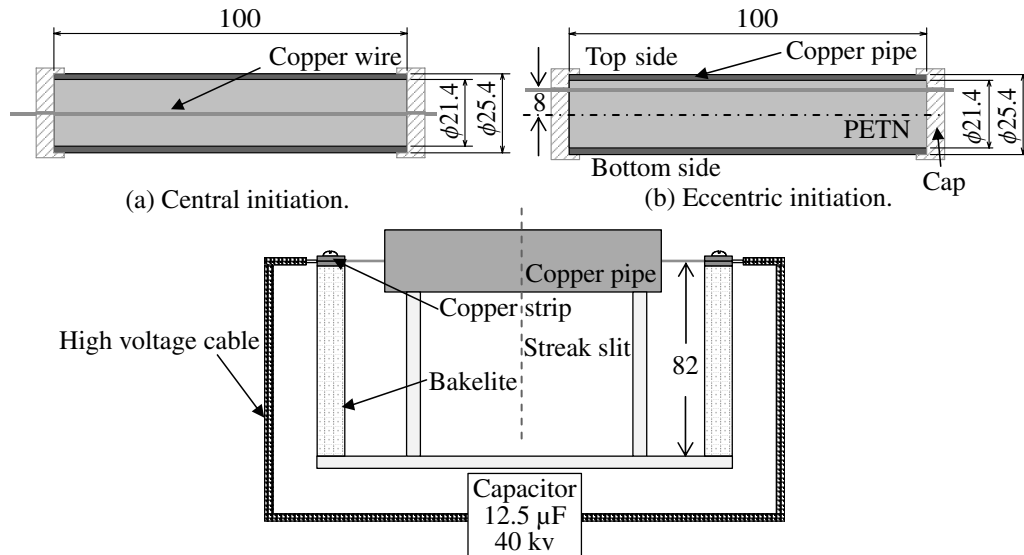


Fig. 1 Experimental setup used for expansion of a copper pipe.

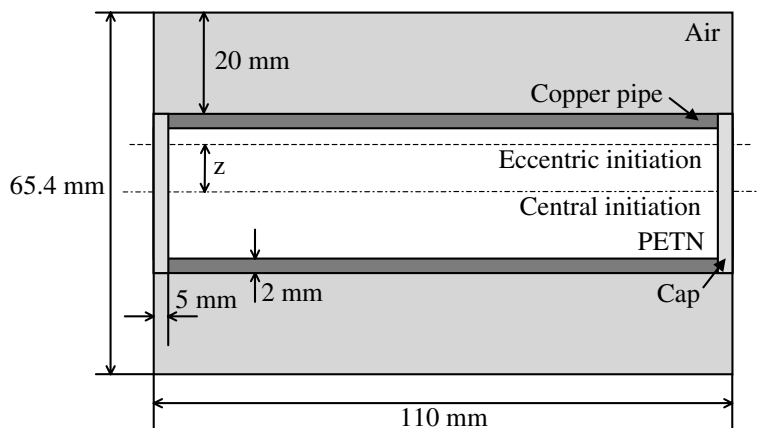


Fig. 2 Numerical analysis model.

はこの距離(z)は3 mm, 5 mm, 8 mmとした。

数値解析において、爆発、流体問題にはEuler法が適しており、固体の模擬にはLagrange法が適していることが知られている⁸⁾。本数値解析では、爆薬部、空気部にEuler法を適用し、一つのEulerメッシュ内で多成分の物質の挙動を模擬できるMulti-Material機能を使用した。銅パイプ部及びキャップ部にはLagrange法を適用した。この時、流体はEulerメッシュによって計算されるが、初期に流体が存在しない部分には空気を模擬し、銅パイプ、キャップ部にあたるLagrangeメッシュをオーバーラップした。両者はFSI (Fluid Structure Interaction) アルゴリズム⁹⁾によって相互作用計算が行われた。これは、相互作用するEulerメッシュの応力テンソル及びそのEulerメッシュにオーバーラップされているLagrangeメッシュの法線ベクトルから面に働く応力ベクトルを求め、その力がLagrangeメッシュのノードに与えられ、貫通を防ぐための反力がEuler物質に作用することで計算される。Euler法とLagrange法の基礎方程式を以下に示す。なおLS-DYNA3Dにおいて、これらの定式の粘性項は無視されている。

Euler法

質量保存則

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \cdot \text{div}(v) - v_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (1)$$

運動量保存則

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{ij,j} - \rho \cdot v_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

エネルギー保存則

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} = \sigma_{ij} \cdot \varepsilon_{ij} - \rho \cdot v_i \frac{\partial e}{\partial x_j} \quad (3)$$

Lagrange法

運動量保存則

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{ij,j} \quad (4)$$

エネルギー保存則

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} = \sigma_{ij} \cdot \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

ここでρは密度、σはCauchy応力を示している。またLS-DYNA3Dを用いたLagrange法において質量は自動的に保存される。

PETNにはJWL (Jones-Wilkins-Lee) 状態方程式¹⁰⁾を適用した。実験で使用されたPETNと対応するJWLパラメータはKHT (木原-疋田-田中) コードから算出した。また銅パイプについてはMie-Grüneisen状態方程式¹¹⁾、空気についてはLinear Polynomial状態方程式¹²⁾を適用した。キャップはベークライト(フェノール樹脂)とし、密度1250 kg·m⁻³、縦弾性係数5.2 GPa等で模擬された。各状態方程式は以下のように表される。

JWL状態方程式

$$P_{JWL} = A \left[1 - \frac{\omega}{VR_1} \right] \exp(-R_1 V) + B \left[1 - \frac{\omega}{VR_2} \right] \exp(-R_2 V) + \frac{\omega e}{V} \quad (6)$$

ここでA, B, R₁, R₂, ωはいずれもJWLパラメータであり、Vは未爆ごう爆薬と爆ごう生成ガスとの密度比(ρ₀/ρ)で、ρ₀は爆薬の充填密度、ρは爆ごうガスの密度である。eは単位質量あたりの内部エネルギーである。

Mie-Grüneisen状態方程式

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left[1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right] + \Gamma_0 \rho_0 e \quad (7)$$

ここで、η = 1 - (ρ₀ / ρ), c₀, s は材料定数であり、Γ₀ はGrüneisenパラメータである。

Linear Polynomial状態方程式

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (8)$$

ここで、

$$C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0, C_4 = C_5 = \gamma - 1$$

であり、γは比熱比である。

本数値解析で使用したPETNのJWLパラメータ、銅のMie-Grüneisenパラメータ、空気のLinear PolynomialパラメータをTable 1, Table 2, Table 3に示す。

爆薬の反応率の算出にはC-J Volume burnを使用した。V, V_{CJ}をそれぞれ爆薬の比体積、C-J状態時の比体積とすると次式より爆薬の反応率Wが算出される。

$$W = \frac{1 - V}{1 - V_{CJ}} \quad (9)$$

Table 1 JWL parameter of PETN.

ρ (kg m ⁻³)	A (GPa)	B (GPa)	R ₁	R ₂	ω
800	157.21	3.80	5.68	1.36	0.22

Table 2 Mie-Grüneisen parameter of copper.

ρ ₀ (kg m ⁻³)	c ₀ (m s ⁻¹)	s	Γ ₀
8930	3940	1.49	1.96

Table 3 Linear polynomial parameter of air.

ρ ₀ (kg m ⁻³)	γ	C ₄	C ₅
1.025	1.403	0.403	0.403

4. 結果及び考察

φ0.5 mmの銅細線を爆発させた際の放電電流波形をFig. 3に示す。電流波形には銅細線の蒸発、プラズマ化への相転移を示す変曲点がA点で確認でき、この点で細線が爆発する⁵⁾。この時の電流値は28.3 kAであり、電流を印加し始めてから約13 μs後に相転移した。また、衝撃電流のピーク値までの平均立ち上がり速度は2.5 GA·s⁻¹程度であった。

Fig. 4は中心起爆の実験における銅パイプ拡張のストリーク写真を示す¹³⁾。銅パイプが上下対称に拡張していることが写真から確認できる。銅細線は斉一性よくPETNを起爆したと言える。銅パイプは銅細線に電流を印加し始めて17.58 μs経過後に拡張を始めた。上記の電流計測結果及び細線爆発のみの光学観察から、PETNが起爆し銅パイプが変形するまでの時間は約4.5 μsであった。

ストリーク写真によって得られた銅パイプの拡張距離と時間の関係をFig. 5に示す¹³⁾。なお、拡張が始まった時点での時間を0としている。図より、偏心起爆による銅パイプの下側が最も大きく拡張しており、次に中心起爆と続く。これは、銅細線からパイプ壁までのPETNの葉厚が関係していると考えられる¹⁴⁾。

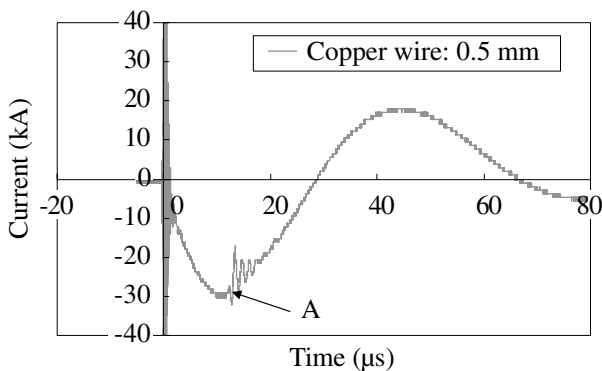


Fig. 3 Current wave measured by Rogowski coil (Copper wire, φ0.5 mm).

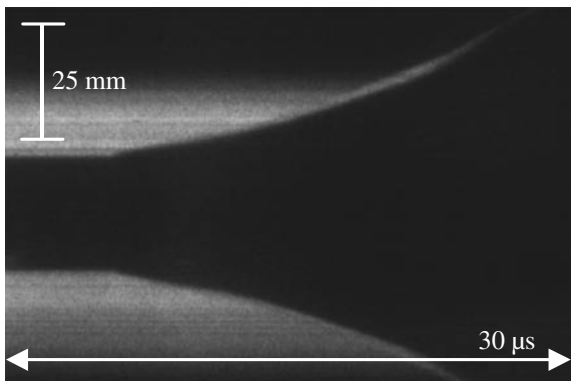


Fig. 4 Streak photograph of the expansion of a copper pipe by central axis initiation.

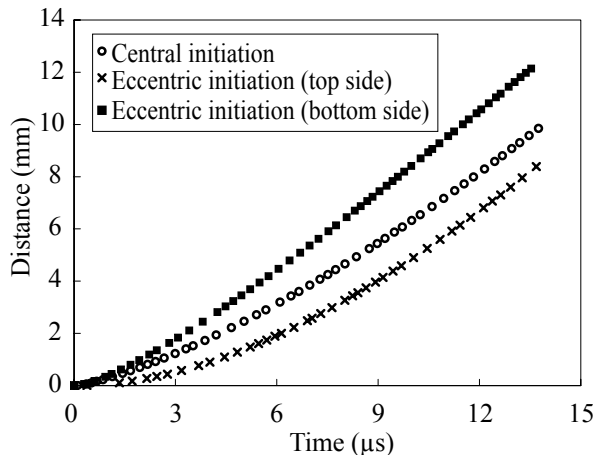


Fig. 5 Relation between the distance and time of the expansion of a copper pipe.

数値解析から得られた、中心起爆と偏心起爆の圧力分布図をFig. 6に示す。PETNの爆ごう波の伝播を見易くするために、数値解析モデルの左端部から30 mmまでをカットし、出力している。中心起爆の圧力分布図において、PETNの爆ごう波は一様に銅パイプへ作用していることが確認できる。偏心起爆では、中心軸の8 mm上方で起爆されたPETNの爆ごう波が、まず上側の銅パイプに作用し、その際に発生した反射波が下側への爆ごう波を追っていることが確認できる。

Fig. 7 (a)は銅パイプの拡張速度について、実験結果と数値解析結果を比較しており、良好な一致を示している。なお、図中E.Xが実験結果を、N.A.が数値解析結果を示している。数値解析では拡張速度に振動が見られるが、これは厚さ2 mmの銅パイプ中で衝撃波が反射を繰り返すことが原因であると考えられる¹⁵⁾。偏心起爆の場合、PETNの爆ごう距離の長い銅細線より下側において、銅パイプの初期拡張速度が急峻な立ち上りを示し、その後1060 m·s⁻¹ほどに収束する。爆薬の爆ごうによって対象物が拡張もしくは変形する際、通常、時間の経過とともに拡張速度は収束するが、偏心起爆における上側の銅パイプの拡張速度は比較的長時間向上を続ける。これは、下側の銅パイプで発生した反射波と細線より下側のPETNが爆ごうした後に発生する爆ごうガスが上側のパイプの拡張速度に影響を及ぼしていることが考えられる。Fig. 7 (b)は数値解析によって得られた、中心軸から3 mm、5 mm偏心させた場合の銅パイプの拡張速度を示している。この結果からも、同じ爆薬を使用した場合、爆薬の葉厚が初期拡張速度及び収束速度と大きな関係をもつと言える。初期拡張速度は爆薬の爆ごうによって発生する爆ごうエネルギーに起因し、またこのエネルギーが銅パイプに作用した際に発生する反射波と爆ごうガスの量によって、収束部分の速度も中心起爆と偏心起爆の上側、下側で異なると考えられる。

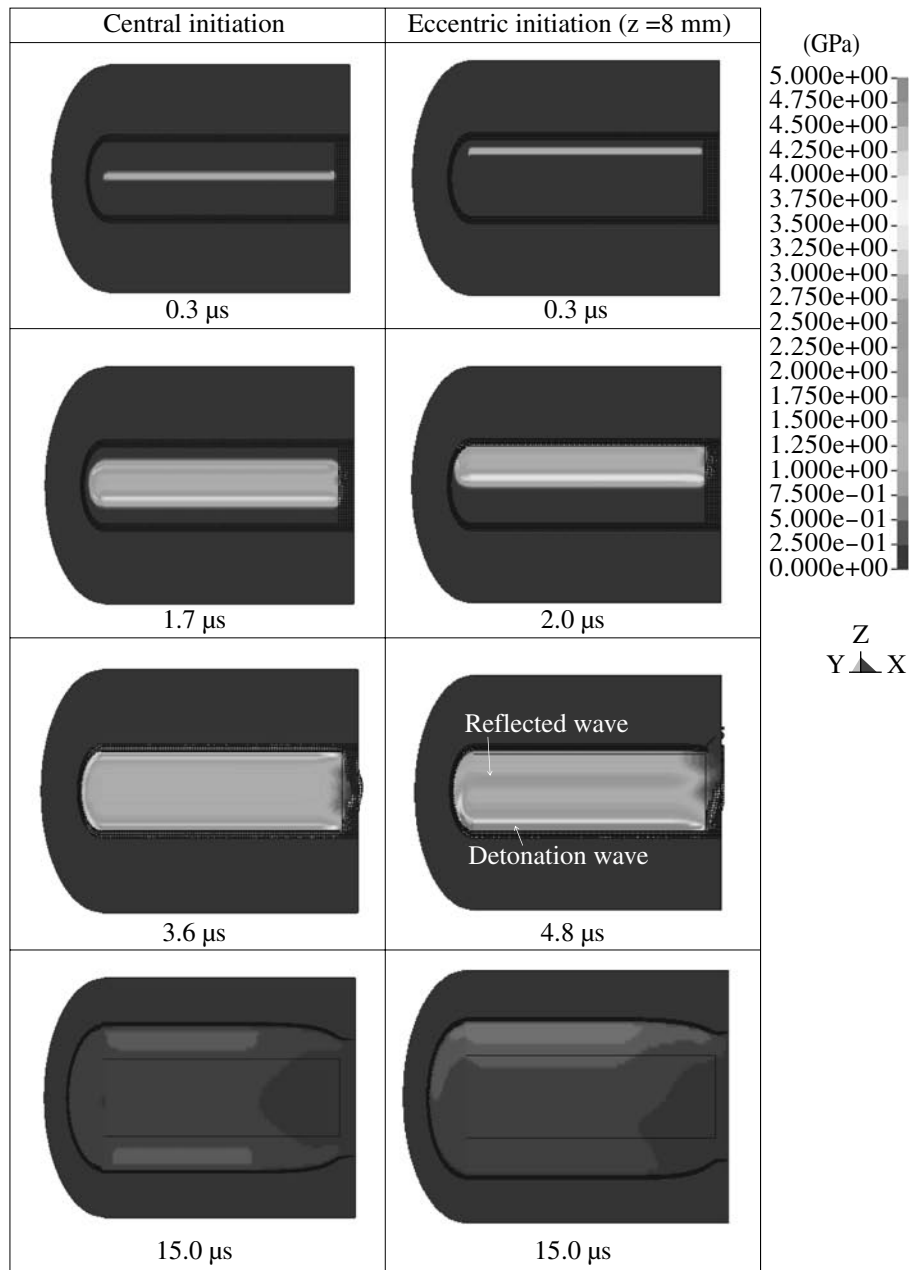
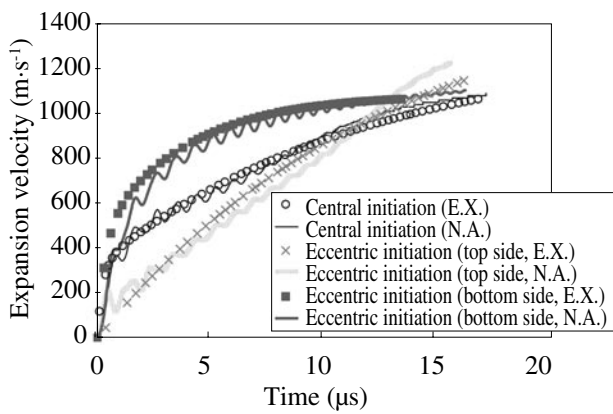
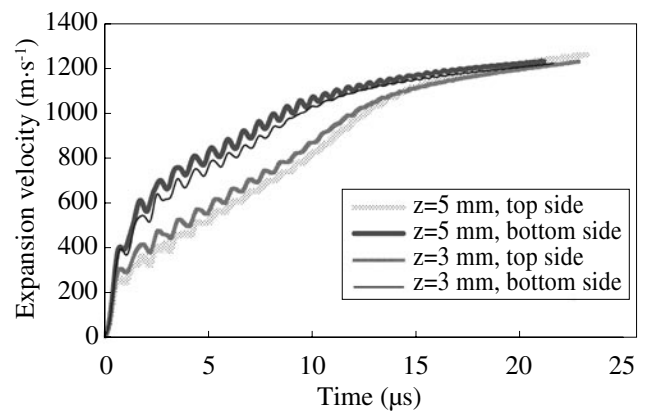


Fig. 6 Pressure contours for central initiation and eccentric initiation.



(a) Comparison of experimental and numerical analysis results for the expansion velocity vs time.



(b) Graphical representation of numerical analysis results for expansion velocity vs time.

Fig. 7 Relation between the expansion velocity and time for different initiation.

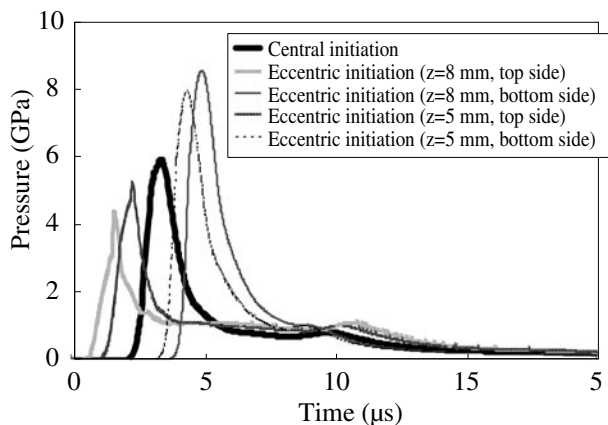


Fig. 8 Pressure histories of the incident detonation wave and the reflected shock wave at the boundary of PETN and copper.

Fig. 8に銅パイプとPETNの境界におけるPETNの爆ごう圧力及び反射波の圧力履歴を示す。PETNの爆ごうによる圧力値は、中心起爆や偏心起爆の条件で異なることから、PETNの爆ごうは定常状態に達していないものが多いと推測される。拡張速度を示した際の考察どおり、偏心起爆における上側の銅パイプ直前の圧力履歴は、銅細線より下側のPETNの爆ごうとパイプでの反射波の影響により圧力波の作用時間が長くなっていることが分かる。逆に下側の銅パイプとPETNの境界における圧力履歴は、PETNの爆ごうによる圧力波のみが確認できる。

5. 結言

PETN粉体爆薬の起爆源として用いた銅細線の配置を変更することによって、銅細線爆発で瞬時起爆されたPETN爆薬が銅パイプへ及ぼす影響及びその指向性について実験および数値解析を行った。金属細線として $\phi 0.5$ mmの銅細線を準備し、PETN爆薬は外径25.4 mm、長さ100 mm、肉厚2 mmの銅パイプに充填密度約 $800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ で充填した。キャパシターバンクとして充電電圧40 kV、静電容量12.5 μF 、充電エネルギー10 kJを使用した。

光学観察及び放電電流波形の計測により、銅細線に印加された電流値と起爆の斉一性が確認された。銅パイプの初期拡張速度は、爆ごうするPETNの葉厚と比例関係を示した。拡張の収束速度は、PETNの爆ごうエネルギーが銅パイプに作用した際に発生する反射波に起因すると考察された。銅パイプとPETNの境界におけるPETNの爆ごう圧力と反射衝撃圧力履歴が数値解析によって明らかにされ、圧力の作用時間が銅パイプの拡張に関係すると確認された。金属細線の配置によって爆ごうエネルギー及び対象物の制御が可能であるということが示された。

謝辞

本研究は、21世紀COEプログラム「衝撃エネルギー科学の深化と応用」の助成により遂行されたものであり、ここに謝意を表す。また、実験において、熊本大学衝撃・極限環境研究センターの秋丸進助手に適切なお助言を頂いた。ここに深謝します。

References

- 1) W. Jiang and K. Yatsui, IEEE Transactions on Plasma Science, 26, 1498 (1998).
- 2) U. M. Alvarez, A. M. Loske, E. Castano-Tostado, and F. E. Prieto, Innovative Food Science and Emerging Technologies, 5, 459 (2004).
- 3) H. Akiyama, "Kouden-atsu Pulse Power Kougaku", p. 126 (2003), Ohm Co..
- 4) T. Hiroe, H. Matsuo, K. Fujiwara, M. Yoshida, S. Fujiwara, M. Miyata, and T. Akazawa, Kogyo Kayaku (Sci. Tech. Energetic Materials), 53, 219 (1992).
- 5) T. Abe, M. Yoshida, T. Hiroe, K. Fujiwara, and H. Matsuo, Kayaku Gakkaishi (Sci. Tech. Energetic Materials), 60, 226 (1999).
- 6) S. Tanaka, K. Hokamoto, and S. Itoh, Proc. of 2006 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, ISBN 0-7918-3782-3, I749CD (2006), American Society of Mechanical Engineers Pressure Vessel and Piping Division and International Council on Pressure Vessel Technology, Vancouver, Canada.
- 7) M. Otsuka, E. Hida, K. Kurogi, and S. Itoh, Spring Meeting, pp.105-106 (2006), Japan Explosives Society, Tokyo.
- 8) M. Katayama and T. Tanaka, Kayaku Gakkaishi (Sci. Tech. Energetic Materials), 62, 257 (2001).
- 9) N. Aquelet, M. Souli, and L. Olovsson, Computer methods in applied mechanics and engineering, 195, 110 (2006).
- 10) E. L. Lee, H. C. Horing, and J. W. Kury, "Adiabatic expansion of high explosive detonation products", p. 10 (1968), Lawrence Livermore Laboratory, UCRL-50422.
- 11) S. P. Marsh, "LASL Shock Hugoniot Data", p. 57 (1980), University of California Press.
- 12) J. O. Hallquist, "LS-DYNA Theoretical Manual", p. 13.5 (1998), Livermore Software Technology Corporation.
- 13) M. Otsuka, E. Hida, K. Kurogi, and S. Itoh, Sci. Tech. Energetic Materials, 66, 365 (2005).
- 14) T. Hiroe, H. Matsuo, K. Fujiwara, T. Abe, K. Kusumegi, and T. Katoh, J. Materials Processing Technology, 85, 56 (1999).
- 15) M. A. Meyers, "Dynamic Behavior of Materials", p. 229 (1994), A Wiley-Interscience Publication.

Controlled expansion of a copper pipe and detonation of PETN initiated by metal wire explosion technique

Masahiko Otsuka*†, Eiji Hida**, Kenji Kurogi**, Mhamed Souli***,
and Shigeru Itoh****

In recent years, active research on explosives in exploring its effective use in the field of engineering is widely carried out. One way of instant initiation of explosive is by means of a metal wire explosion. The wire explosion technique generates plane shock waves produced by exploding parallel metal wire rows using a high voltage impulsive current. This method has been performed as mass shock compaction processing technology, such as shock synthesis of industrial diamond. The present study was undertaken to investigate the behavior of copper pipe by the detonation of PETN powder explosive initiated by metal wire explosion. This was carried out with the motivation to know the effect of PETN on the structure, which was detonated by metal wire explosion, and the detonation state of PETN. A copper wire exploded using metal wire explosion technique, was used to initiate the PETN filled in the copper pipe. The expansion process of the copper pipe by the detonation of PETN was evaluated by the optical observation using high-speed camera and the numerical analysis using LS-DYNA3D. The results on the expansion velocity of copper pipes showed a variation depending on the initiation and the amount of PETN used for the expansion.

Keywords: Wire explosion, Initiation method, Multi-Material formulation, Fluid-Structure interaction

*Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, JAPAN

†Corresponding address: masahiko@shock.smrc.kumamoto-u.ac.jp

**Engineering & Development Department, Oita Plant, Explosives Division, ASAHI KASEI CHEMICALS Corporation, 2620 Oaza-Sato, Oita 870-0392, JAPAN

***Universite des Sciences et Technologies de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq, Lille, FRANCE

****Shock Wave and Condensed Matter Research Center, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, JAPAN