

エマルジョン爆薬の爆轟特性について

高橋勝彦*, 藤田昌大**, 小島正樹**
 村田健司*, 加藤幸夫*, 伊東 繁**

アルミニウムを0~15 wt.%含有させたエマルジョン爆薬の非理想爆轟状態の解明を爆轟速度測定及び光学的観測により検討した。

爆轟速度測定の結果、実験範囲内において、エマルジョン爆薬がコンフレイメントの強い銅パイプに充填された場合の爆轟速度はコンフレイメントの弱いPMMAに充填された場合の爆轟速度より約500 m/s速くなることわかった。エマルジョン爆薬が銅パイプに充填された場合の爆轟速度はKHTモードで得られた計算値の86~90%であり、PMMAパイプに充填された場合の爆轟速度は計算値の77~80%となり、非理想性が強くなる。また、光学的観測の結果、エマルジョン爆薬が銅パイプに充填された場合、爆轟に伴う発光はほぼ平面性を維持して進行することがわかった。一方、エマルジョン爆薬をPMMAパイプに充填して平面起爆した場合、しばらくは平面な形状を保つがその後膨張波の影響を受け非理想爆轟を呈し始め、爆轟が約30 mm程度進行すると定常な非理想爆轟状態になることがわかった。

1. 緒 言

爆薬を爆轟させることにより発生するエネルギーは、鉱山や土木の工事現場において岩盤の破碎などの目的で古くから用いられてきた。爆薬の爆轟によるエネルギーは動的な破壊力と静的な破壊力に大別される。動的エネルギーは爆轟によって発生する衝撃波により、静的エネルギーは爆轟生成ガスによって発生し高い破壊効果が得られる。

産業用爆薬は安全で、安価であり、かつ破壊効果が高めることが要求されることからANFO、スラリー、エマルジョン爆薬等、硝酸アンモニウムをベースとした爆薬が中心となっている。これら硝酸アンモニウムをベースとした爆薬は高性能爆薬と異なり、反応速度が遅いことから非理想爆轟を呈する爆薬であることが知られている^{1,2)}。

非理想爆轟とは、定常的に伝播する爆轟波であるが、

その特性値が爆轟させる薬径、密閉強度等の条件に依存し、無限大薬径を想定した場合より低い圧力、低い速度で進行する爆轟状態である。これは爆薬自身の反応速度の遅さに基づいて反応帯が長くなっていること、側方への熱損失による反応速度の低下、側方及び後方からの膨張波の影響によるものと言われている。

硝酸アンモニウムをベースとした産業用爆薬の非理想爆轟を解明することは理想的な発破効果を得るための発破設計にとって極めて重要なことである。しかし、ここ20年間の日本国内の研究は爆薬の性能あるいは感度に関する報告が中心であり非理想爆轟に関する研究はほとんど見あたらない^{3,4)}。諸外国においても同様であり、最近になって少し非理想爆轟に関する研究報告がなされてきた程度である⁵⁾。

本研究では、産業用爆薬としてエマルジョン爆薬を選び、エマルジョン爆薬が呈する非理想爆轟現象及びアルミニウム粒子を添加することによる爆轟特性への影響を光学的観測実験及び爆轟速度測定により明らかにし、エマルジョン爆薬が産業用爆薬としてより効果的に利用できるようにすることを目的とする。特に、本報告では非理想爆轟特性に影響を与える因子の内、コンフレイメントの効果を検討するために銅及びPMMAの容器にエマルジョン爆薬を充填して検討した。

1997年7月28日受理

*日本油脂(株)愛知事業所武豊工場
 〒470-23 愛知県知多郡武豊町字北小松谷61-1
 TEL 0569-72-0915
 FAX 0569-73-7376

**熊本大学工学部知能生産システム工学科
 〒860 熊本県熊本市黒髪2-39-1
 TEL 096-342-3741
 FAX 096-342-3729

Table 1 Composition of the emulsion explosives

Explosives	Emulsion (wt.%)	Aluminum (wt.%)	GMB (wt.%)				
EMX 1	95.00	—	5.00				
EMX 2	90.25	5.00	4.75				
EMX 3	85.50	10.00	4.50 </tr <tr> <td>EMX 4</td> <td>80.75</td> <td>15.00</td> <td>4.25</td> </tr>	EMX 4	80.75	15.00	4.25
EMX 4	80.75	15.00	4.25				

GMB: Glass Micro Balloon

Table 2 Physical properties of the confinement materials

Confinement	Density (kg/m ³)	Sound Velocity (m/s)	Acoustic Impedance (10 ⁶ Ns/m ²)
Copper	8930	3940	35.18
PMMA	1180	2260	2.67

2. 実験方法

2.1 試料

実験には成分の異なる4種類のエマルジョン爆薬(日本油脂(株)製: EMX 1~EMX 4)を用いた。これらの爆薬は次の様に調整し使用した。エマルジョンは酸化剤水溶液/オイル=94/6(重量比)からなり、このエマルジョンに気泡保持材として直径15~40 μ mのガラスマイクロバルーン(GMB)及び平均粒径6.5 μ mの表面処理を行っていないアルミニウム粉末(Valimet Inc.製)を混合し、エマルジョン爆薬とした。これら調整したエマルジョン爆薬の組成をTable 1に示す。これらのエマルジョン爆薬を所定の寸法の銅(C 1330 T)及びPMMAパイプに充填し試料とした。また、Table 2には実験に用いた容器材質である銅及びPMMAの特性値を示す。

2.2 爆轟速度の測定

エマルジョン爆薬の爆轟速度に及ぼすアルミニウムの影響を検討するための実験装置の概略をFig. 1に示す。外径40mm、肉厚5mm、長さ160mmの銅及びPMMAにエマルジョン爆薬を充填して、端面より6号電気雷管で起爆させ、50mmの平均速度をイオンギャップ法により求めた。

2.3 光学的観測

エマルジョン爆薬の非理想爆轟状態を解明するための、光学的観測実験の実験装置の概略をFig. 2に示す。エマルジョン爆薬を外径40mm、肉厚5mmの銅とPMMAの2種類の円筒容器に充填し、爆薬レンズにより平面起爆した。主爆薬の長さLは定常な爆轟波となるために十分な長さと考えられる50mmとした。ま

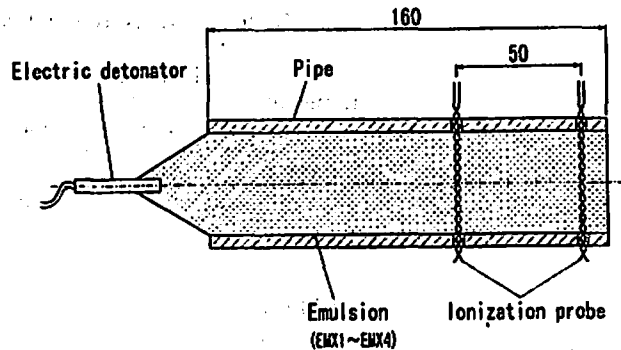


Fig. 1 Schematic of the detonation velocity measurement system

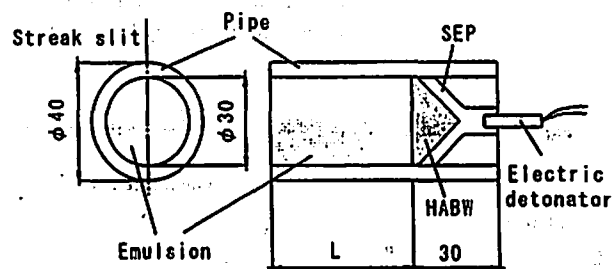


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus for optical measurements

た、爆薬EMX 2をPMMA容器に充填した場合について、主爆薬の長さを5、10、20、30、40及び50mmと変化させ非理想爆轟の発生の様子を検討した。爆薬レンズは2種の高性能爆薬SEP(旭化成工業(株)製: 爆轟速度6970 m/s、充填密度1310 kg/m³)及びHABW(旭化成工業(株)製: 爆轟速度4970 m/s、充填密度2200 kg/m³)から成り6号電気雷管で起爆した。爆轟波は円筒容器中を伝播し、爆薬端面に到達する。同図に示される位置にストリークのスリットをあわせ、イメージコンバータカメラ(HADLAND PHOTONICS社製: IMACON 790、最大駒撮り間隔2000万駒/s、最高流し速度1mm/nsec)を使用し、爆薬端面に到達する爆轟波に伴う発光(自発光)をストリーク撮影した。実験ではストリーク速度は100 nsec/mmでフィルム感度はISO 20,000で撮影した。閃光時間が50 μ secのキセノンフラッシュライト(HADLAND PHOTONICS社製、HL 20/50型フラッシュユニット、出力500 J)を光源として使用した。ディレイジェネレータ(HADLAND PHOTONICS社製、THREE CHANNEL DELAY GENERATOR, TYPE JH-3CDG)により電気雷管の起爆時間とキセノンフラッシュライトの発光開始時間を制御することで爆轟現象とフラッシュライトの発光を同期させた。また、距離校正はブロックゲージの撮影により実行し、時間校正はディレイジェネレータの付属機能により実行

Table 3 Measured and calculated detonation velocity

Explosives	Loading density (kg/m ³)	Measured Dv (m/s)		Calculated Dv (m/s)
		Copper pipe	PMMA pipe	
EMX 1	1100	5015 (0.88)	4520 (0.80)	5670
EMX 2	1150	5235 (0.90)	4570 (0.79)	5820
EMX 3	1190	5225 (0.87)	4610 (0.78)	5911
EMX 4	1230	5185 (0.86)	4610 (0.77)	5996

Dv : Detonation Velocity

The number in parentheses shows the measured relative velocity to the calculated velocity (REV).

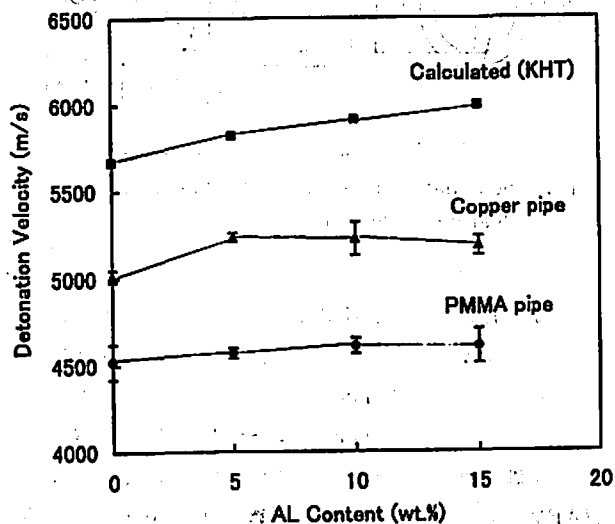


Fig. 3 Variations of measured and calculated detonation velocity with aluminum content

した。

なお、光学系については伊東ら⁶⁾が既に報告しているのでここでは詳細な説明は省略する。

3. 結果及び考察

3.1 爆轟速度測定結果

Table 3 及び Fig. 3 に爆轟速度の測定結果を KHT コード^{7,8)}による計算結果とあわせて示す。KHT コード中ではアルミニウムは100%反応したものととして計算した。表中の括弧内の数字は相対的爆轟速度 (REV) である。これは KHT コードより得られる爆轟速度に対する測定された爆轟速度の比率であり、爆轟状態の理想性の度合いを示す。エマルジョン爆薬を銅パイプに充填した場合、アルミニウムを含有していない EMX 1 の爆轟速度は 5015 m/s でありアルミニウムを 5 wt.% 含む EMX 2 では爆轟速度は 5235 m/s となり、アルミニウムの添加は爆轟速度を増加させている。

さらにアルミニウムの添加量が 10, 15 wt.% と増加した EMX 3 及び EMX 4 の爆轟速度は各々 5225 m/s, 5185 m/s でありアルミニウム含有量が増加しても爆轟速度はほとんど変化していない。一方、エマルジョン爆薬を PMMA パイプに充填した場合、EMX 1 の爆轟速度は 4520 m/s であり銅パイプに充填した場合と比較して約 500 m/s 低くなっており、コンファイメントの影響を強く受けていることがわかる。また、アルミニウム含有の EMX 2 ~ EMX 4 の爆轟速度は各々 4570 m/s, 4610 m/s 及び 4610 m/s であり、アルミニウム添加の有無にかかわらずほぼ一定である。

これらの結果から、銅パイプに充填されたエマルジョン爆薬の REV は 0.86 ~ 0.90 であることが示される。これに対してコンファイメントの低い PMMA パイプに充填されたエマルジョン爆薬の REV は 0.77 ~ 0.80 であり、爆轟状態は銅パイプと比較し、非理想性が強くなっていることがわかる。コンファイメントの強い銅パイプの場合でも、測定された爆轟速度が計算値より低くなっているのは薬径の効果によるものと考えられる。

3.2 光学的観測結果

Photo. 1 に外径 40 mm, 肉厚 5 mm, 長さ 50 mm の銅及び PMMA パイプに EMX 1 ~ EMX 4 を充填して得られたストリーク撮影の観測結果を示す。この写真の横軸は時間を表し、縦軸は長さでスリット内の現象を表している。即ち、写真の白い部分が爆轟による自発光の時間変化を示している。例えば、EMX 1 が PMMA パイプに充填された場合の写真より、中心付近が早く発光し始め、その後時間の経過とともに次第にパイプの壁面付近が発光している様子を示していることがわかる。これは爆轟に伴う発光の形状が進行方向に対して凸型になっていることを示す。この傾向は

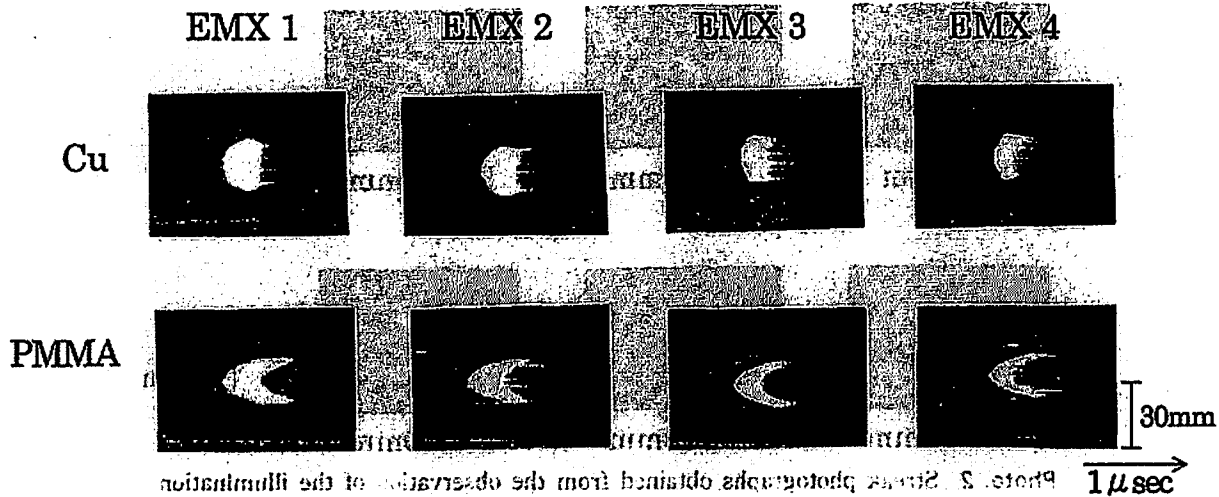


Photo. 1 Streak photographs obtained from the observation of the illumination due to the detonation wave of the emulsion explosives charged into the copper pipe

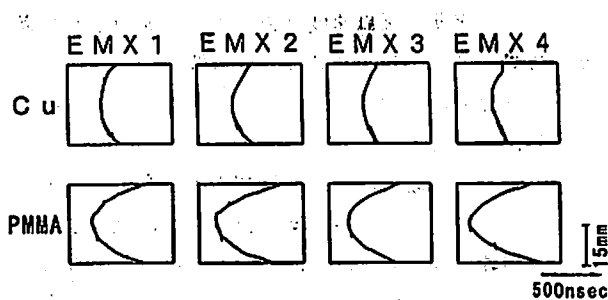


Fig. 4 The arrival time of the illumination due to the detonation wave of the emulsion explosives

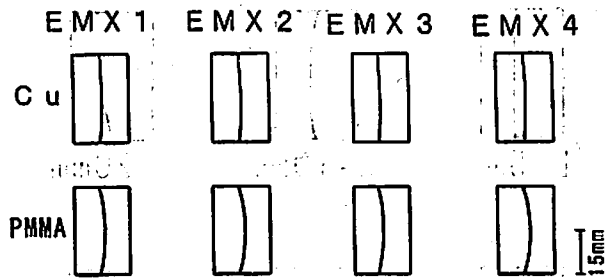


Fig. 5 The front of the illuminated zone of four kinds of the emulsion explosives charged into the copper pipe and the PMMA pipe

銅パイプに比較してコンファイメントの低いPMMAパイプの方が顕著である。

このストリーク撮影で得られた写真をもとに爆轟波の形状を推測するために画像処理を行った。これらのストリーク写真をイメージスキャナを用いて読み、ラブラシアンフィルタによる輪郭線処理を実施し発光部分をもとめた。この結果をFig. 4に示した。これらはストリーク写真と同様横軸が時間を表し、縦軸がスリット方向の距離を表す。これらの図より、各半径における発光の始まる時間差を得ることができる。この時間差と爆轟波速度によって自発光部分の形状を求めその結果をFig. 5に示した。この発光部分は爆轟波面の形状を反映しているものであり、爆轟波の形状に近いものと推察される。この結果より、発光部分の形状は爆薬を充填する容器によってその傾向が変わっている。爆薬を銅パイプにした場合、発光は僅かに湾曲しているもののほぼ平面になっており、理想状態に近い爆轟をしているものと考えられる。一方、爆薬がPMMAパイプに充填された場合は、明らかにパイプ壁面付近が中心部に比較して進行が遅れており凸型の形状をしている。これらのことより爆薬をPMMAパ

イプに充填した場合は、銅パイプに比較してPMMAの音響インピーダンスがかなり低いために膨張波の影響を受けやすく非理想爆轟性が強く現れるものと考えられる。

次に爆薬をPMMAに充填した際の非理想爆轟の発生機構を検討するために、EMX 2をPMMAパイプに充填し、パイプの長さを変え自発光の様子を観察した。その結果、得られたストリーク写真をPhoto. 2に示した。同図よりパイプの長さが5mm、10mmと短い場合は最初に爆薬の中心付近が同時に発光し始めており、パイプが長くなるに従ってこの部分が小さくなり、30mm、40mmになるとこの形はほぼ同じとなり定常状態になっていることがわかる。このことを理解しやすくするために、これらのストリーク写真を前述と同じ方法で画像処理を実施し、発光部分の形状をまとめたものをFig. 6に示す。パイプ長が5mmにおいては発光はほぼ平面形状をしており、その後パイプが長くなるにつれて膨張波の影響を受け、次第に平面な部分が減少し丸みを帯びてくる。パイプ長が30mm及び40mmになると、この平面部分はなくなり、ほぼ同一の凸型を示す。これらのことよりエマルジョン爆薬は、

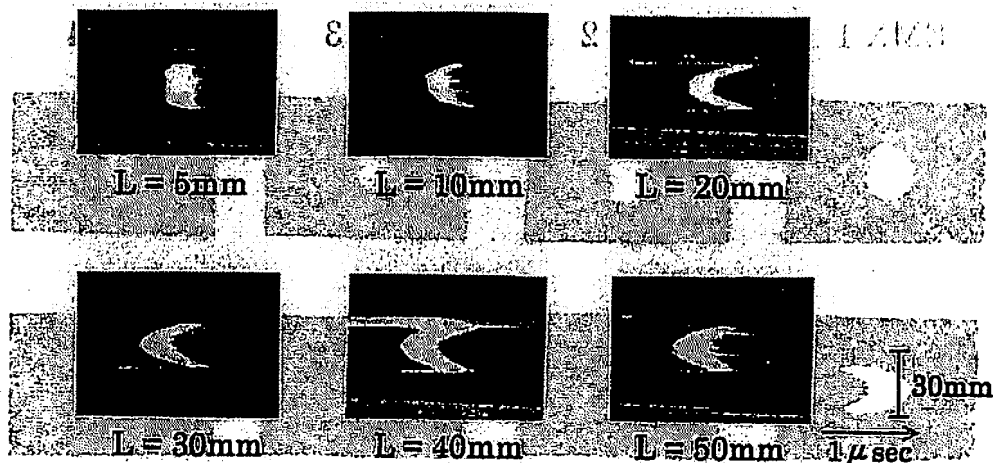


Photo. 2 Streak photographs obtained from the observation of the illumination due to the detonation wave of EMX 2 charged into the PMMA pipe with different length (L represents the length of the PMMA pipe).

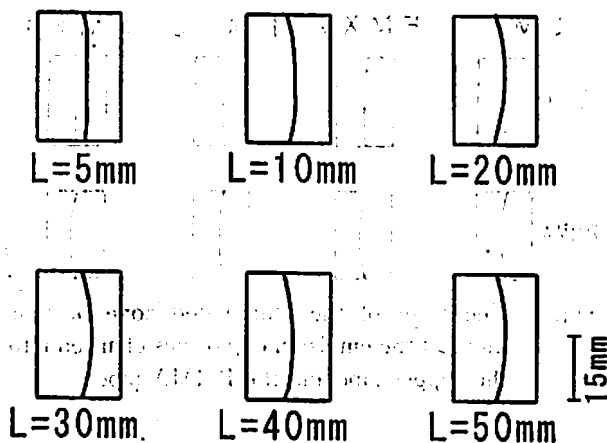


Fig. 6 The front of the illumination zone of EMX 2 charged into the PMMA pipe with different length (L represents the length of the PMMA pipe)

爆薬レンズによって平面起爆されてしばらくは平面な形状を保つがその後膨張波の影響を受け次第にパイプ壁面の爆轟が遅れ始め、非理想爆轟を呈し始めることがわかる。爆轟波が30mm程度進行すると定常な非理想爆轟となる。

4. 結 言

爆轟速度測定及び光学的観測実験によりエマルジョン爆薬の非理想爆轟状態の解明を試みた。エマルジョン爆薬の爆轟速度を測定した結果、爆薬を充填する容器が銅パイプの場合、アルミニウムを含有してないEMX 1の場合で爆轟速度が5015 m/sであった。アルミニウムが添加されると爆轟速度が若干増加し、アルミニウム含有量が5、10及び15 wt.%では爆轟速度が各々5235、5225及び5185 m/sであり、ほとんど変化がなかった。一方、PMMAパイプに充填されたエ

マルジョン爆薬の爆轟速度は銅パイプに充填された爆薬の爆轟速度に比較して約500 m/s低くなっており、かつ実験範囲内においてはほとんどアルミニウム添加の効果は現れなかった。

また、光学的観測により非理想爆轟の発生の様子を検討した。エマルジョン爆薬が銅パイプに充填された場合は爆轟に伴う発光はほぼ平面性を維持して進行することが確認できた。一方、エマルジョン爆薬をPMMAに充填して平面起爆した場合、しばらくは平面な形状を保つがその後膨張波の影響を受け非理想爆轟を呈し始め、爆轟が約30mm程度進行すると定常な非理想爆轟状態となることがわかった。

文 献

- 1) 枝村康司, 廣崎義一, 酒井洋, 服部勝英, 工業火薬協会春期大会講演要旨集, 95(1984)
- 2) 服部勝英, 深津壽章, 酒井洋, 工業火薬協会誌, 43, 295(1982)
- 3) 三宅淳巳, 小川輝繁, A. C. van der Steen, H. H. Kodde, 工業火薬協会誌, 52, 285(1991)
- 4) 三宅淳巳, 小川輝繁, 斎藤修二, 吉田信生, 工業火薬協会誌, 52, 336(1991)
- 5) D. L. Kennedy, Journal de Physique IV, 5, c4-191(1995)
- 6) 伊東繁, 久保田士郎, 吉良章夫, 長野司郎, 藤田昌大, 火薬学会, 55, 202(1994)
- 7) 田中克己, “爆薬の爆轟特性解析”, 化学技術研究所(1983)
- 8) 田中克己, “爆轟特性解析プログラム KHTバージョン4.4”, 工業技術院物質工業技術研究所, CRC総合研究所(1995)

On detonation properties of the emulsion explosives

by Katsuhiko TAKAHASHI*, Masahiro FUJITA**, Masaki KOJIMA**
Kenji MURATA*, Yukio KATO* and Shigeru ITOH**

In order to obtain a better understanding of the non-ideal detonation behavior, measurements of the detonation velocity and optical measurements were carried out. Four kinds of the emulsion explosives (EMX) with different aluminum contents (0–15wt.%) were used in experiments. These EMX were put into a copper and a PMMA pipe.

The detonation velocity of EMX charged into the copper pipe is about 500m/s faster than that of EMX charged into the PMMA pipe. In the range of experimental results, the measured relative detonation velocity to the calculated detonation velocity (REV) of EMX charged into the copper pipe is 0.86–0.90 and REV of EMX charged into the PMMA pipe is 0.77–0.80.

In the case of the copper pipe, the shape of illuminated zone due to the detonation wave is almost plane. On the other hand, in the case of the PMMA pipe, the illuminated zone of EMX, initiated by plane detonation wave is initially kept on the plane shape and then curves near the pipe wall and its shape becomes a convex by a rarefaction wave. After the detonation wave run about 30mm from the initiated plane, the detonation behavior of EMX becomes steady and non-ideal.

(*NOF Corporation 61–1 Kitakomatsutani Taketoyo Chita Aichi, Japan 470–23

**Kumamoto University, Faculty of Engineering 2–39–1 Kurokami
Kumamoto, Japan 860)