

## エマルション爆薬の爆轟特性(第2報)

## 爆轟波面形状の光学的観察

廣崎義一\*, 澤田徹哉\*, 加藤幸夫\*,  
濱嶋英樹\*\*, 伊東 繁\*\*

種々の大きさの気泡体を含有するエマルション爆薬の爆轟波面形状が光学的に観測された。気泡体としてガラスマイクロバルーンやシリカバルーンなどの無機質発泡体と、樹脂である有機質の発泡体が用いられた。気泡体の直径がおよそ0.5mmよりも小さい場合には気泡体の材質に関係なく爆轟波面は滑らかであるが、それよりも大きくなると波面に乱れが生じた。これは気泡体の発光を捕らえているために生じたものと考えられた。Wood-Kirkwoodの提案した式に基づいて波面の曲率から計算された反応領域の長さは、Eyringの式に基づいて爆轟速度の形状効果から求められた反応領域長さと比較的よく一致した。爆薬中の水分の増加、アルミニウム粉の添加等による反応領域の長さへの影響が評価された。

## 1. はじめに

硝酸アンモニウムを主成分とするエマルション爆薬は、他の多くの産業爆薬と同様に必須成分として気泡体を含有する不均一系の爆薬である。その反応速度はいわゆる高級爆薬とは異なって遅いことから、非理想爆轟を呈する爆薬として知られている。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薬の薬径、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も低い圧力、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爆薬の反応領域が長くなっていること、とくに側方からの膨張波の影響によって反応速度が低下することなどが影響しているものと考えられる。非理想爆轟の性状は、たとえば爆轟速度をパラメータとして選んだ場合、ホットスポットとして作用すると考えられる気泡体の大きさならびに量によって大きく影響されることを前報<sup>1)</sup>で示した。エマルション爆薬の反応領

域の長さは内在する気泡体の大きさならびに量によって決まるものと考えられる。前報<sup>1)</sup>においては爆薬の爆轟速度の薬径依存性、すなわち実測された爆轟速度が爆薬直径の逆数に比例するとした場合のその傾きから反応領域の長さを求めた<sup>2)</sup>が、光学的に観測された爆轟波面の形状から反応領域の長さを求めることもできる。ここではエマルション爆薬の爆轟波面形状を光学的に観察し、そこから得られた情報を前報で得られた結果と対比することによってエマルション爆薬の爆轟特性を明らかにすることを目的とした。

## 2. 実験

## 2.1 試料

実験に用いたエマルションマトリックスの基本組成は前報で用いたものと同じであり、硝酸アンモニウム/硝酸ナトリウム/水/油分=77.66/4.68/11.22/5.40 (wt.%)である。酸素バランスは0.4g/100g、密度は1.39g/cm<sup>3</sup>である。このエマルションマトリックスに気泡体としてTable 1に示す単一般構造または複合殻構造の中空球体を種々の割合で添加し、よく混和してエマルション爆薬を得た。また、2.2.1項に方法を示す光学的測定における要求から、エマルション爆薬には着色剤として微粉末のグラファイトを重量比で0.3%添加した。

アルミニウム粉を添加した試料においては、GMBの添加によって爆薬密度が0.90, 1.05, 1.15および

2000年4月21日受理

\*日本油脂(株)愛知事業所武豊工場研究開発部  
〒470-2398 愛知県知多郡武豊町北小松谷61-1  
TEL 0569-72-0921  
FAX 0569-73-7376

E-mail nofrdfx@gld.mmtr.or.jp

\*\*熊本大学衝撃・極限環境研究センター  
〒860-8555 熊本市黒髪町2丁目39番1号  
TEL 096-342-3299  
FAX 096-342-3299  
E-mail itoh@mech.kumamoto-u.ac.jp

Table 1 Characteristics of balloons used in the study

Name	Average diameter (mm)	Standard deviation (mm)	Particle density (g/cm <sup>3</sup> )	Structure	Material	Note
GMB	0.047	0.019	0.212	Mono-cell	Glass	"K-25" of 3M
SMB	0.496	0.093	0.230	Multi-cell	Silica	Silica balloon "NW"
RB-1	0.053	0.023	0.027	Mono-cell	Acrylonitrile / vinylidene chloride	Expancel 91 DE
RB-2	0.079	0.029	0.022	Mono-cell	Acrylonitrile	F-80 ED, Matsumoto
RB-3	0.472	0.062	0.051	Multi-cell	Polystyrene	Expanded polystyrene
RB-4	1.728	0.273	0.032	Multi-cell	Polystyrene	Expanded polystyrene
RB-5	2.420	0.403	0.064	Multi-cell	Polystyrene	Expanded polystyrene

1. 25g/cm<sup>3</sup>に調整される爆薬配合組成に、平均粒子径が33 μmのアトマイズドアルミニウムを外割で5重量%添加し、均一になるようによく混和した。

爆薬中の水分を増加させた試料においては、上記の基本配合組成率のうち水を11.2%から15.0%または19.0%に増加させた配合比とした。爆薬密度はガラスマイクロバルーン(GMB)の添加によって1.25g/cm<sup>3</sup>に調整された。

## 2. 2 実験方法

### 2. 2. 1 光学的観測

光学的観測実験に用いた爆薬試料をFig. 1に示す。内径31mm、外径38mm、長さ100mmの塩化ビニル(PVC)パイプに装填されたエマルジョン爆薬試料を爆薬レンズにより平面起爆した。爆薬レンズは高性能爆薬SEP(旭化成工業(株)製、充填密度1.31g/cm<sup>3</sup>、爆轟速度6970m/s)およびHABW(旭化成工業(株)製、充填密度2.20g/cm<sup>3</sup>、爆轟速度4970m/s)からなり、6号電気雷管で起爆した。爆轟波は試料爆薬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合わせ、イメージコンバータカメラ(HADLAND PHOTONICS社製、IMACON790、最大駒撮り間隔2000万駒/s、最高流し速度1mm/ns)によって軸方向からストリーク撮影した。爆薬端面に到達する爆轟波に伴う発光(自発光)を流し速度100ns/mmで撮影した。距離校正はブロックゲージの撮影により行い、時間校正はディレイジェネレータの付属機能により行った。自発光の撮影によって得られたストリーク写真を画像処理し、半径方向における自発

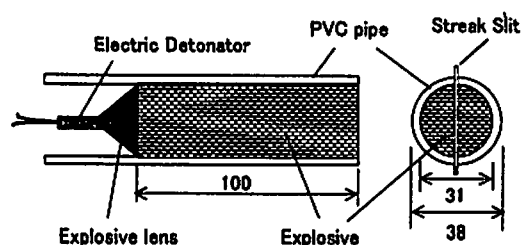


Fig. 1 Explosive for the optical observation test

光の到達時間差を求め発光部分の形状を求めた。なお、爆薬試料は破片の飛散を防止するために、厚さ5mmのPMMA板で水槽を製作しその内部に水を満たした中に爆薬試料を設置した。

### 2. 2. 2 爆轟速度の測定

エマルジョン爆薬を、光学的観測実験に用いたのと同じ内径31mm、外径38mm、長さ160mmの塩化ビニル(PVC)パイプに充填して試料とした。20gのエマルジョン爆薬をブースターとして起爆した。爆轟速度の測定はイオンギャップ法により、イオンギャップの位置として試料パイプの先端から100mmと150mmの区間の平均爆轟速度を測定した。薬温は20℃とした。

## 3. 結果および考察

### 3. 1 爆轟波面形状

エマルジョン爆薬の非理想爆轟の発生状況を観察するために、GMBの添加によって爆薬密度1.25g/cm<sup>3</sup>に調整されたエマルジョン爆薬を塩ビパイプに充填し、パイプの長さを変えた場合の自発光の様子を光学的に

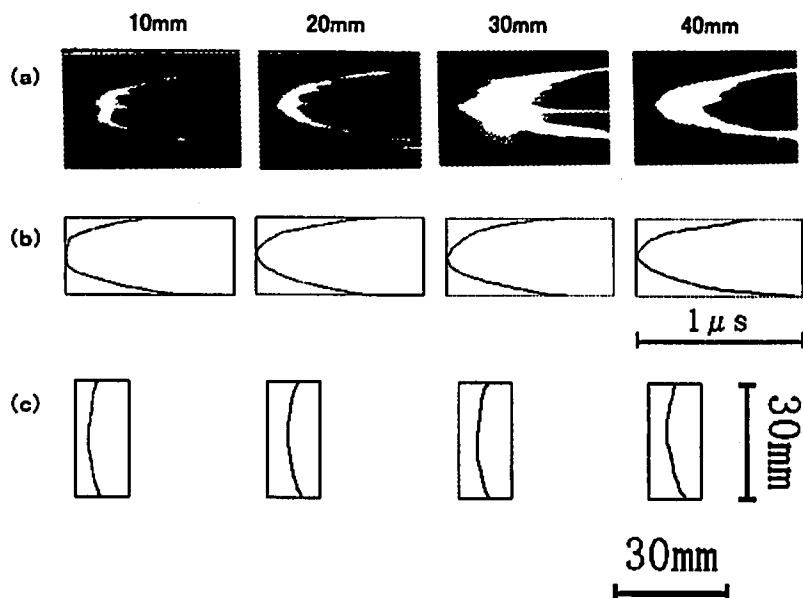


Fig. 2 (a) Streak photographs of the emulsion explosive sensitized with GMB with the thickness of 10, 20, 30 and 40 mm.  
 (b) Contour of the detonation front derived from treating the streak photographs  
 (c) Detonation front curvature in each explosive sample

観測した。その結果得られたストリーク写真をFig. 2 (a)に、画像処理したものをFig. 2 (b)にそれぞれ示す。横軸は時間軸である。パイプの長さが10mmと短い場合は、爆薬の中心部が同時に発光しているために発光面に平坦な部分があるが、パイプの長さが20mmになると中心部が先に発光するため尖頭形をなしていることがわかる。これらの爆薬の爆轟速度からストリーク写真の横軸を距離換算し爆轟波面の形状を求めた結果をFig. 2 (c)に示す。パイプの長さが10mmにおいては発光面は中心部で平坦な形状を保っているが、20mm以上の長さでは膨張波の影響を受け爆轟波面はほぼ同一の凸型を示す。このようにエマルジョン爆薬は爆薬レンズによって平面起爆されてからしばらくは平面の爆轟波面を維持するが、その後は膨張波の影響を受けるため、次第にパイプ壁面近傍の爆轟波面が遅れ始め非理想爆轟を呈し始めることがわかる。この形状の試料で求められた爆轟波面の曲率半径は、薬長20mm以上において44mmであった。

気泡体の種類と添加量を変えて調整された爆薬試料の爆轟波面ストリーク写真をFig. 3 (a)に、画像処理したものをFig. 3 (b)に示す。また、爆轟波面形状の換算した結果をFig. 3 (c)に示す。図中、 $d_b$ は気泡体の平均直径を示し、 $\phi$ は次式で求められる爆薬の空隙率である。

$$\phi = 1 - (\rho - \rho_B) / (\rho_E - \rho_B) \quad (1)$$

ここで、 $\rho$ 、 $\rho_B$ 、 $\rho_E$ はそれぞれ爆薬、気泡体、エマルジョンマトリックスの密度をあらわす。

空隙率の大きな試料では爆轟波面にある気泡体からの発光が強く多少ハレーションを起こしているが、爆轟波面の曲率は空隙率の減少とともに小さくなる傾向のあることがわかる。また、平均粒子径が0.05mmないし0.08mmである小さな気泡体GMB、RB-1またはRB-2を含有する爆薬の爆轟波面は比較的滑らかに見えるが、平均粒子径がそれよりも大きな約0.5mmであるSMBあるいはRB-3を含有する爆薬の爆轟波面には多少の乱れが見られる。とくに空隙率が0.1ないし0.12(爆薬密度として約1.25g/cm<sup>3</sup>に相当)の爆薬においては、爆轟波面での発光量が小さくまた波面の乱れも大きい。これは気泡が大きいほど、また空隙率が小さいほど単位体積中の気泡体数が少ないためであると考えられる。これらよりもさらに大きな直径1.73mmの気泡体を含有する爆薬においては爆轟波面の乱れが大きすぎ、爆轟波面形状を求めるのは困難であった。一例として、気泡体直径が1.73mmであり空隙率が0.59(爆薬密度が0.60g/cm<sup>3</sup>)である爆薬の爆轟波面のストリーク写真をFig. 4に示す。気泡体の体積の方がエマルジョンマトリックス体積よりも大きい、試料爆薬の直径31mmに対して気泡体直径が1.73mmと大きいため、爆薬表面に気泡体がある場合とない場合との発光量に差が生じ、その結果として波面の乱れが大きいものと考えられる。

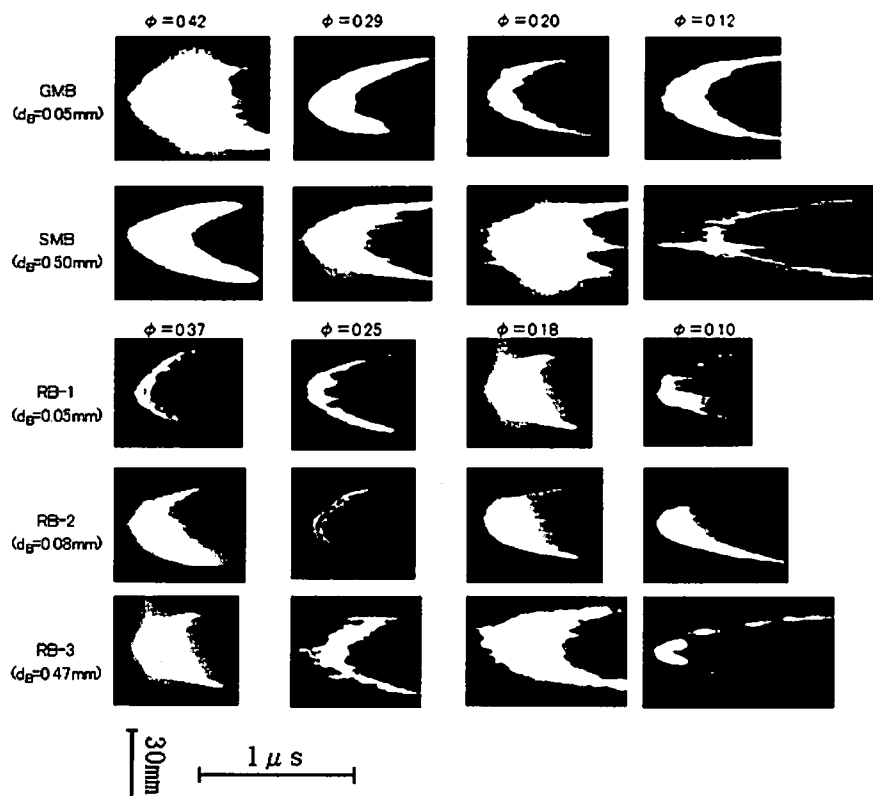


Fig. 3(a) Streak photographs of detonation front in the emulsion explosives sensitized with different sizes and materials of balloons

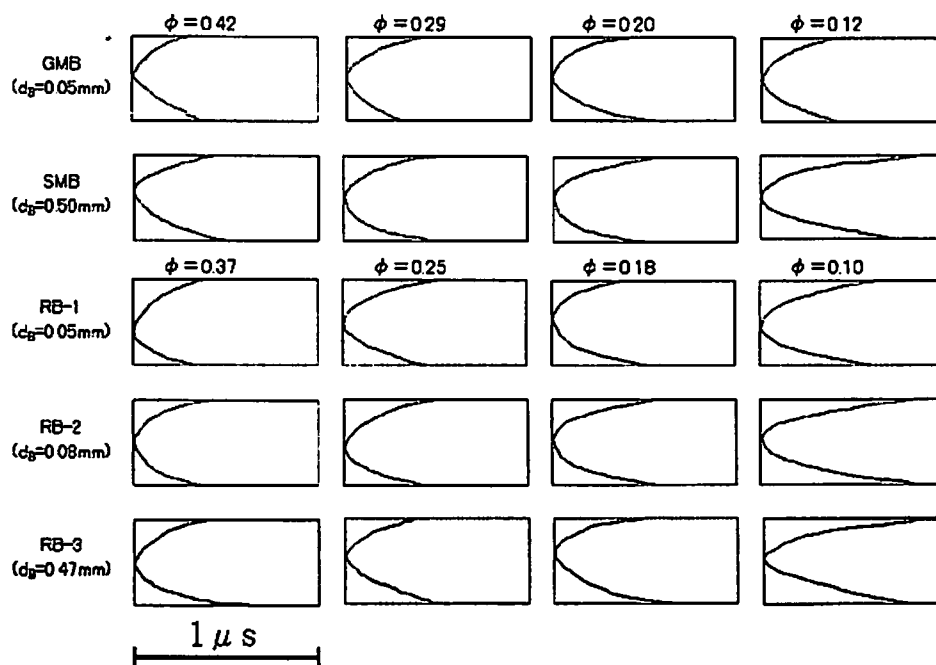


Fig. 3(b) Contour of the detonation front derived from treating the streak photographs

### 3. 2 反応領域

爆轟速度の測定結果および爆轟波面の曲率測定結果をまとめてTable 2に示す。

爆薬の反応領域長さが薬径と反応面の曲率との関係において次式で表されることが、Woodおよび

Kirkwood<sup>3)</sup>によって示されたことはよく知られている。

$$(U_0 - U) / U_0 = 3.5 \xi / S \quad (2)$$

ここで、 $U_0$ は理想爆轟速度、 $\xi$ は反応領域の長さ、 $S$

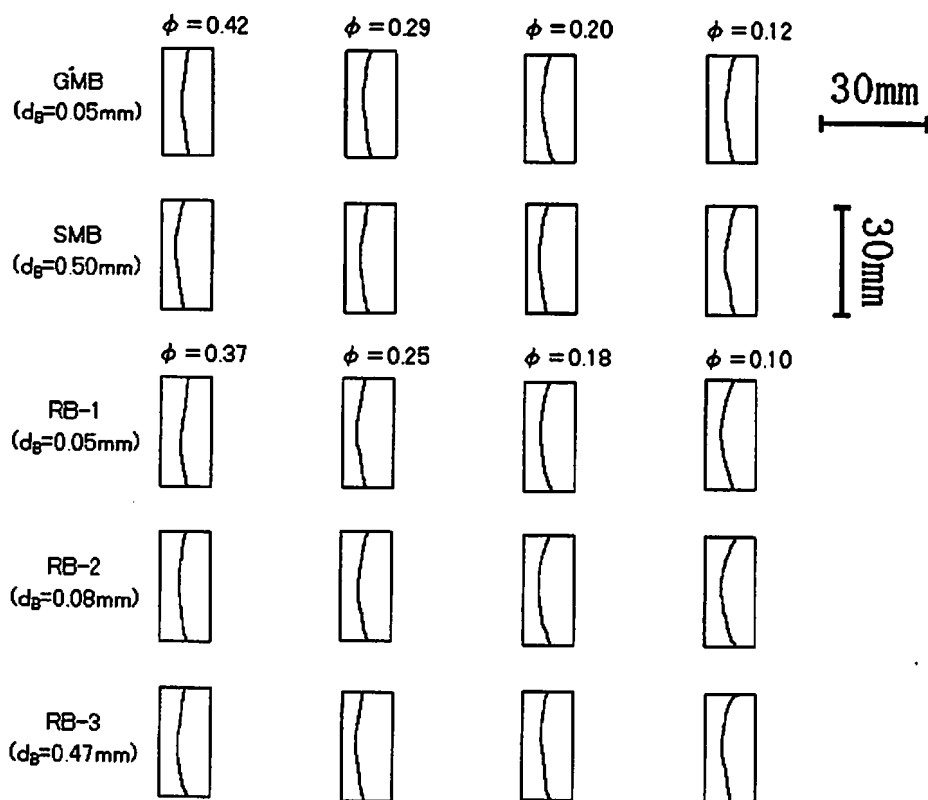


Fig 3(c) Detonation front curvature in the explosive

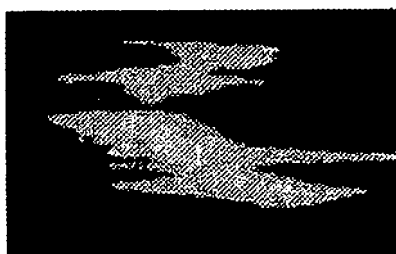


Fig 4 A streak photograph of detonation front in the emulsion explosive containing RB-4 with a diameter of 1.73 mm

は爆轟波面の曲率半径である。この理論から求められた反応領域の長さとしては、例えばHMX/Viton(85/15)の $0.064\text{mm}^4$ 、PBXW-115の $2\text{--}4\text{mm}^5$ などがある。LemarおよびForbes<sup>6)</sup>は直径50mmのコンポジションBと直径41~68mmのPBXN-111の爆轟波面形状を流しカメラ方式で観測し、ベッセル関数を用いたフィッティングでそのデータを近似した。曲率ならびに爆薬表面と波面との角度からWood-Kirkwoodの式(W-K式)を用いて反応領域の長さを計算している。いわゆるグループ2<sup>7)</sup>の爆薬に対して適用された例としては、ErkmanおよびPrice<sup>8)</sup>が行った過塩素酸アンモニウム(AP)とニトログアニジン(NQ)の結果がある。W-K式から求められたAPの反応領域長さ $\xi$ はAP粒径 $9\mu\text{m}$ に対して $1.0\text{--}1.5\text{mm}$ 程度で、密度 $1.2\text{g/cc}$

で極小値を示し、粒径 $25\mu\text{m}$ で約 $5\text{mm}$ で一定であった。これらは次式で示されるいわゆるEyringの式<sup>2)</sup>から計算された反応領域の長さ $A$ に比べて5分の1程度であるとされた。

$$D(R) = D(\infty) (1 - A/2R) \quad (3)$$

ここで $R$ は爆薬半径、 $D(R)$ および $D(\infty)$ はそれぞれ爆薬半径 $R$ および無限大における爆轟速度、 $A$ は定数であり、反応領域の長さに相当する値である。密度 $1.0\text{g/cc}$ のNQにおける $\xi$ の値は $1.3\text{mm}$ 、密度 $1.08\text{g/cc}$ のTNTで $1.2\text{mm}$ 、密度 $1.3\text{g/cc}$ のRDXで $0.2\text{mm}$ であった。

また、古くはCookら<sup>9)</sup>によって硝酸アンモニウムやTNTとの混合爆薬等に対して薬径と爆轟速度、爆轟波面形状が測定され、硝酸アンモニウムの爆轟波面曲率と薬径との比率はほぼ1であることが示された。

爆轟波面形状からではないが、わが国においてはHinoおよびHasegawa<sup>10)</sup>によって炭鉱用粉状爆薬(密度 $0.95\text{g/cm}^3$ )やアンモン爆薬(密度 $1.0\text{g/cm}^3$ )、セミゼラチン(密度 $0.94\text{g/cm}^3$ )、アンモンゼラチン(密度 $1.45\text{g/cm}^3$ )など産業用爆薬の反応領域長さが求められた例がある。爆薬の爆轟速度が種々の薬径に対して測定され、反応領域内で有効に作用する反応熱と爆轟速度との関係から理論仮定されたものであるが、その結

Table 2 Detonation velocity and curvature of detonation front observed in emulsion explosives sensitized with different kinds and quantities of void materials

Void material	$d_B$ (mm)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$1-\phi$	$D_V$ (m/s)	$D_{CJ}$ (m/s)	S (mm)	$\xi$ (mm)	$L_0$ (mm)
GMB	0.05	0.90	0.585	4040	4584	87.2	2.97	1.36
GMB	0.05	1.05	0.711	4670	5292	60.5	2.35	1.97
GMB	0.05	1.15	0.796	4760	5742	52.5	2.57	2.31
GMB	0.05	1.25	0.880	5090	6169	72.8	3.64	1.61
SMB	0.50	0.90	0.578	3980	4548	59.7	2.13	2.41
SMB	0.50	1.05	0.707	4070	5268	56.3	3.66	2.27
SMB	0.50	1.15	0.793	3510	5726	49.1	5.43	1.98
SMB	0.50	1.25	0.879	3340	6160	44.3	5.79	2.71
RB-1	0.05	0.90	0.640	4720	4981	70.4	1.05	1.02
RB-1	0.05	1.05	0.750	5150	5568	48.7	1.04	2.39
RB-1	0.05	1.15	0.824	5380	5904	36.9	0.94	2.55
RB-1	0.05	1.25	0.897	5150	6250	38.5	1.94	2.44
RB-2	0.08	0.90	0.640	4410	4981	70.7	2.32	1.88
RB-2	0.08	1.05	0.750	4900	5568	53.6	1.84	1.80
RB-2	0.08	1.15	0.824	5320	5904	39.8	1.12	2.44
RB-2	0.08	1.25	0.897	5210	6250	29.7	1.41	3.37
RB-3	0.47	0.90	0.634	4040	4959	63.5	3.36	1.96
RB-3	0.47	1.05	0.746	3730	5509	71.7	6.62	1.49
RB-3	0.47	1.15	0.821	3210	5874	68.2	8.84	2.28
RB-3	0.47	1.25	0.895	2940	6237	63.4	9.58	2.24
RB-4	1.73	0.60	0.418	2910	3860	×	×	×
RB-4	1.73	0.80	0.566	2860	4612	×	×	×
RB-4	1.73	1.00	0.713	2550	5347	×	×	×
GMB(Al)	0.05	0.91	0.576	4320	4572	71.1	1.12	1.25
GMB(Al)	0.05	1.07	0.703	4930	5378	66.4	1.58	1.76
GMB(Al)	0.05	1.17	0.798	5380	5806	43.1	0.90	1.87
GMB(Al)	0.05	1.27	0.888	5690	6231	34.9	0.88	3.95
GMB(W15)	0.05	1.25	0.881	5320	6087	39.1	1.41	2.60
GMB(W19)	0.05	1.25	0.881	5210	6027	54.7	2.12	2.55

$d_B$ ; balloon diameter,  $\rho$ ; explosive density,  $\phi$ ; void volume fraction,  $D_V$ ; detonation velocity,  $D_{CJ}$ ; ideal detonation velocity, S; curvature of detonation front,  $\xi$ ; reaction zone length,  $L_0$ ; detonation lag at the edge of the charge, ×; not available

GMB(Al); Five weight percent of aluminum is added into the explosive formulation,

GMB(W15) and GMB(W19); Water of 15% and 19% in the explosive formulation respectively

果は上記の爆薬に対する反応領域長さとして2~4 mmであった。

KennedyおよびJones<sup>11)</sup>は、W-K式はアレニウス型

の反応速度を前提としているために衝撃波面のすぐ背後の反応速度は低く、そこからすぐに急速に上昇して完全反応に近くなることならびにフォンノイマンスパ

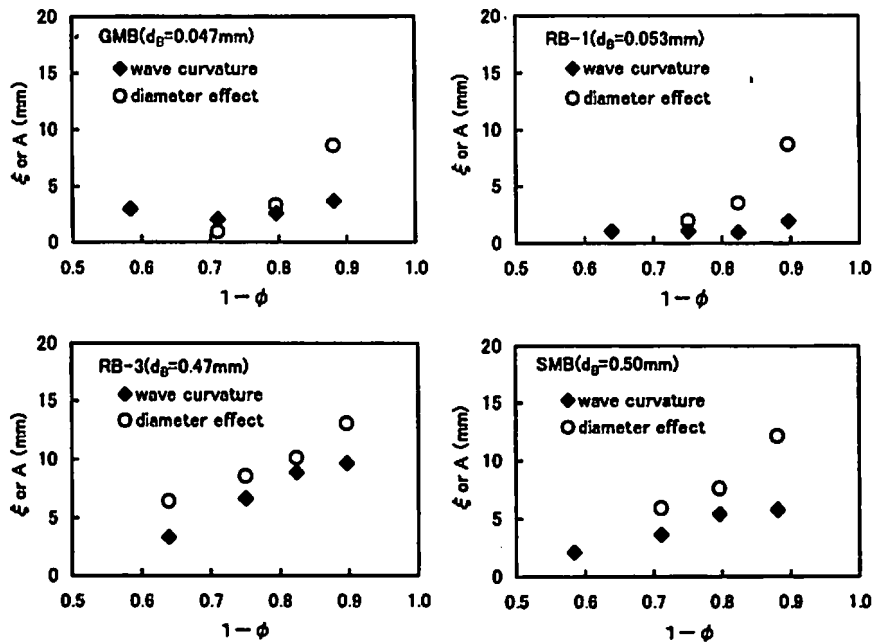


Fig. 5 Comparison of the reaction zone length in the emulsion explosive derived from the detonation wave curvature (◆) and that determined from the diameter effect on the detonation velocity (○)

イクで圧力プロファイルが平面状であることなどを前提としているため、非理想爆薬に対しては適用できないとしている。

われわれの実験によって得られた波面曲率SからW-K式を用いて反応領域長さξを求めた結果をTable 2に示した。これらのうち、前報においてと同じ気泡体を用いたものについてはいわゆるEyringの式<sup>2)</sup>、すなわち爆轟速度の薬径依存性から求められた反応領域長さAとの対比を行った。結果をFig. 5に示す。W-K式から計算された反応領域長さξは(3)式から求められた反応領域長さAに比べて小さな傾向を示すものの両者は比較的良好に一致している。

爆轟波面形状から反応領域の長さを求める手法としては上記のほかいくつかある。たとえばBdzil<sup>12)</sup>はWood-Kirkwood理論を一般化した定常状態での薬径効果を数値理論化した。それは衝撃波面の曲率と爆轟速度、薬径と爆轟速度の関係に適用されるが、この理論は高密度の爆薬に適用できるものであり、ニトロメタンおよびPBX-9404に対して実験と理論とでよい一致が見られている。この理論が産業爆薬に適用可能かどうかは検証されていない。

Souers<sup>13)</sup>は円柱状薬において反応領域の平均長さ $X_E$ の薬径効果が次式で関係づけられるとした。

$$D(R)/D(\infty) = 1 - X_E/\sigma R \quad (4)$$

ここでRは爆薬半径、D(R)およびD(∞)はそれぞれ

Rおよび無限大薬径における爆轟速度、σは爆薬壁面の動きの度合いを表わす関数である。σは非密閉系の円柱状薬に対しては次式で与えられる。

$$\sigma = 11 \exp(-8 X_E/R) + 2 \quad (5)$$

われわれの実験で得られたデータにおいては $X_E$ は数mmのオーダー、Rは25.5mmであるので(5)式のexp項は無視でき、σは2とみなすことができる。このとき(4)式はEyringの式(3)にほかならない。また、SouersおよびGarza<sup>10)</sup>は円柱の壁面における距離遅れ $L_0$ は反応領域長さ $X_E = L_0$ で関係づけられるとし、PBXやニトロメタン系の爆薬群に対してこの方法で得られた $L_0$ が、爆轟速度の薬径効果で得られた反応領域長さ $A$ と比較的良好に一致することを示した。参考までにわれわれの実験結果に対してこの関係より求められた $L_0$ をTable 2に併記したが、他の方法で求められた反応領域長さ $A$ とのよい一致は認められなかった。これはFig. 3からもわかるように、われわれによって撮影された爆轟波面の写真において爆轟波面が中心からずれていることや測定精度によるものと思われる。

本研究で用いられた光学的観察による爆薬の反応領域長さの評価を、他の爆薬組成に適用してみた。アルミニウム粉を5%添加した爆薬試料の爆轟波面を観測した結果ならびに水分を変化させた試料(空隙率0.12、爆薬密度で約1.25g/cm<sup>3</sup>)の爆轟波面観測結果をFig. 6 (a)およびFig. 6 (b)に、ストリーク写真による

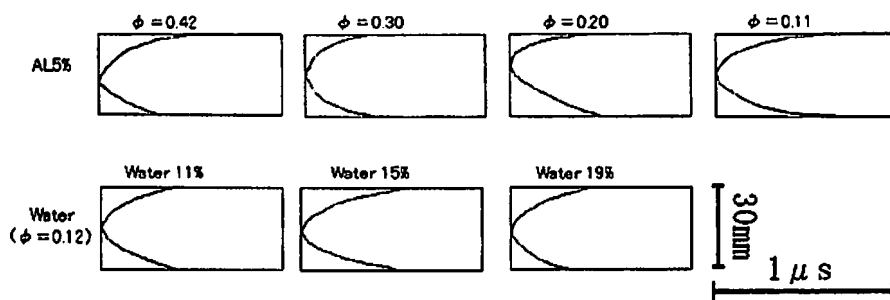


Fig. 6(a) Contour of the detonation front derived from treating the streak photographs for the aluminized emulsion explosives or the emulsion explosive with higher water content

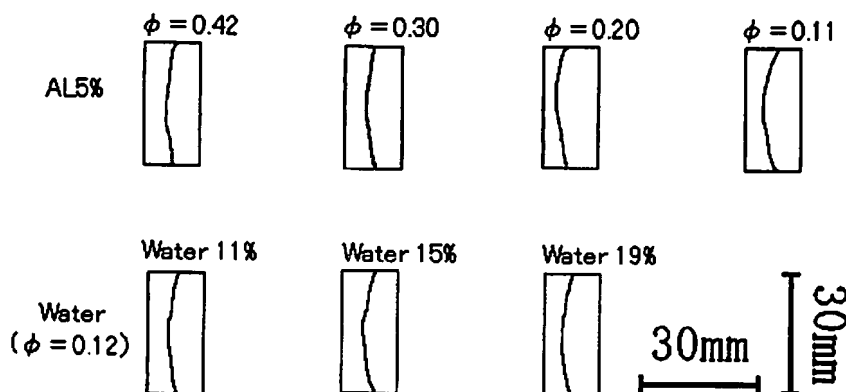


Fig. 6(b) Detonation front curvature in the emulsion explosives

波面輪廓線および波面形状でそれぞれ示す。また波面曲率ならびに計算された $\xi$ をTable 2に記した。アルミニウム粉を添加した試料の反応領域長さは1mm程度であり、アルミニウム粉が添加されない試料の2~3mmと比べてやや短い傾向にある。また水分が15%および19%に増加された試料のそれは2mm前後であり、11%の場合とあまり変わらない。

#### 4. 結 論

異なる大きさ、量および材質の気泡体を含むエマルジョン爆薬の爆轟波面形状が観察され、Wood-Kirkwoodの式(W-K式)によって反応領域長さ $\xi$ が求められた。またこの値は爆轟速度の葉径効果(Eyringの式)から求められた反応領域長さAと比較された。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 気泡体の直径が0.5mm以下の場合には爆轟波面は滑らかである。
- (2) 気泡体の材質は波面形状に影響を及ぼさない。
- (3) 0.5mm以下の大きさの気泡体を含むエマルジョン爆薬に対して得られた $\xi$ とAとは比較的良好一致する。

#### 文 献

- 1) 廣崎義一, 高橋康博, 加藤幸夫, 濱嶋英樹, 伊東繁, 火薬学会誌, 61, 201(2000)
- 2) Eyring, H., Powell, R. E., Duffey, G. H., Parlin, R. B., Chemical Review, 45, 69(1949)
- 3) Wood, W. W., Kirkwood, J. K., The Journal of Chemical Physics, 22, No. 11, 1920(1954)
- 4) Green, L. G., James, Jr, E., Proceedings of the Fourth Symposium on Detonation, pp. 86(1965)
- 5) Forbes, J. W., Lemar, E. R., Baker, R. N., Proceedings of the Ninth Symposium on Detonation, pp. 806(1989)
- 6) Lemar, E. R., Forbes, J. W., Proceedings of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression, pp. 1385(1993)
- 7) Price, D., Proceedings of the Eleventh Symposium on Combustion, pp. 693(1966)
- 8) Erkman, J. O., Price, D., NOLTR p. 69(25 May 1970) (1970)
- 9) Cook, M. A., Mayfield, E. B., Partridge, W. S. J. Phys. Chem., 59, 675(1955)



- 10) Hino, K., Hasegawa, S., 工業火薬, 20, 2(1958)  
11) Kennedy, D. L., Jones, D. A., Proceedings of the  
Tenth Symposium on Detonation, pp. 665(1993)  
12) Bdzil, J. B. J. Fluids Mech. 108, 195(1981)  
13) Souers, P. C., Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 22, 221(1997)  
14) Souers, P. C., Garza, R., Shock Compression of  
Condensed Matter, 1997, 325(1998)

---

## Detonation behavior of emulsion explosives ( II )

### Optical observation of detonation front in emulsion explosives

Yoshikazu HIROSAKI<sup>\*</sup>, Tetsuya SAWADA<sup>\*</sup>, Yukio KATO<sup>\*</sup>,  
Hideki HAMASHIMA<sup>\*\*</sup>, and Shigeru ITOH<sup>\*\*</sup>

The detonation front curvatures were observed with an optical technique for the emulsion explosives sensitized with various sizes of inorganic or organic microballoons. The detonation fronts in the emulsion explosive sensitized with smaller voids up to 0.5 mm are smooth, and those in the emulsion explosives containing larger balloons are shown to be turbulent. The reaction zone length calculated from the Wood-Kirkwood equation, which relates the curvature of the detonation wave front and the reaction zone length, correlate fairly well with that derived from the Eyring's equation, which gives the reaction zone length from the diameter effect of the detonation velocity. The effects of the increase of water content and the addition of aluminum powder into the emulsion explosive formulation were evaluated by observing the detonation front curvatures to calculate reaction zone length.

(\*Taketoyo Plant, NOF Corporation, 61-1 Kitakomatsudani, Taketoyo-cho, Chita-gun, Aichi 470-2398, JAPAN

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