

エマルション爆薬の爆轟特性(第3報)

比較的大きな気泡体を含むエマルション爆薬の限界薬径

廣崎義一*, 田中新也*, 加藤幸夫*, 伊東 繁**

平均粒子直径が0.05mmから2.42mmである, 粒子密度の小さな有機質の気泡体を含むエマルション爆薬において, それら気泡体の大きさおよび量が限界薬径に及ぼす影響が検討された。反応モデルとして, ホットスポットとしての気泡体の表面に接触する部分の爆薬が反応を開始し, 反応生成ガスの増大に伴うホットスポットの大きさの成長が気泡体直径の2乗に比例する, すなわち面積に比例するという仮定が設けられた。その結果, 限界薬径は爆薬中の気泡体表面間の距離に比例することが示された。同一の爆薬空隙率では, 気泡体直径が小さいほど気泡体表面積が大きく, 気泡体間の距離も小さいことから, 爆薬の限界薬径は気泡体表面に接触する爆薬の反応速度によって支配される度合いが大きい。これに対して, 気泡体が大い場合はその表面積が小さく, 爆薬の限界薬径は爆薬自体の反応速度に依存し, 気泡体間距離に関係するが, いずれの場合も限界薬径は気泡体表面間距離によって決まる。また, 気泡体の大きさが一定の場合には, 限界薬径は爆薬の空隙率と相関し, 爆轟速度の薬径依存性から求められた反応領域の長さとの比例関係にあることが示された。

1. はじめに

エマルション爆薬には硝酸アンモニウムを主体とする酸化剤が使用され, 鋭感材として添加される気泡体の種類や量を選択することによって, その爆薬としての性能を容易に調整することができる大きな特長である。発破において, エマルション爆薬のみならず一般的な産業爆薬は, いわゆる死圧を生ずることが知られている。爆薬包が衝撃圧を受けた際に爆薬内部の気泡が圧縮されて小さくなり, 薬径も小さくなって見かけ上の爆薬密度が上昇する。圧縮された爆薬包の薬径がその密度における限界薬径を下回ることが, 死圧発生条件のひとつであると考えられる。エマルション爆薬には, 気泡体としては通常その直径が0.1mm以下程度のガラスマイクロバルーンが使用されることが多く, 大きな気泡を含むエマルシ

ョン爆薬の爆轟特性に関してはあまり研究されていない¹⁾。気泡の大きさが爆薬の感度あるいは爆轟速度等に及ぼす影響に関してはすでにいくつもの報告がなされており, 一般的に気泡が大きくなるにつれて感度が高くなり, 爆轟速度は小さくなる傾向にあることが示されている。気泡の大きさと限界薬径の関係についてもいくつかの報告がなされている^{2)~6)}が, 気泡体の大きさとしては0.5mm程度までの比較的小さなものが使用された例しか見当たらない。前報⁷⁾において, 平均粒子径が0.05mmから2.42mmの有機質からなる気泡体を用いて, その大きさならびに量が爆轟速度に及ぼす影響について報告した。本研究では, 同じく平均粒子径が0.05mmから2.42mmである, 粒子密度の小さな有機質の気泡体を用い, その大きさや量がエマルション爆薬の限界薬径に及ぼす影響について検討した。

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組成ならびに添加される気泡体は, 前報⁷⁾で使用したのと同じである。すなわちエマルションマトリックスの組成は, 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.%)であり, 酸素バランス

2000年4月27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 resin balloons used in the study

Name	Average diameter (mm)	Standard deviation (mm)	Particle density (g/cm ³)	Structure	Material	Note
RB-1	0.053	0.023	0.027	Mono-cell	Acrylonitrile / vinylidene chloride	Expancel 91 DE
RB-2	0.472	0.062	0.051	Multi-cell	Polystyrene	Expanded polystyrene
RB-3	0.795	0.129	0.077	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

は0.4g/100g、密度は1.39g/cm³である。このエマルジョンマトリックスに気泡体としてTable 1に示すような単一殻または複殻構造の気泡体を種々の割合で添加し、よく混和してエマルジョン爆薬を得た。このエマルジョン爆薬を樹脂フィルム(ポリエチレン/ナイロン/ポリエチレン、厚さ100μm)に充填して、所定の円筒内径としたものを試料とした。

2. 2 実験方法

2. 2. 1 限界薬径の測定

前報⁷⁾において、種々の大きさおよび量の樹脂バルーンを含有するエマルジョン爆薬の爆轟速度が、爆薬直径20~50mmに対して測定された。その結果を用い、爆轟伝播する最小薬径と爆轟伝播しない(不爆となる)最大薬径との平均値を限界薬径とした。試験を行った最大薬径である50mmで不爆の場合には限界薬径を55mmとした。また20mm以下の薬径については、所定の薬径になるように2.1項に示した樹脂フィルムで包装された長さ200mmの爆薬包を準備し、その爆轟伝播性から同様に限界薬径を求めた。薬温は20℃とした。

3. 実験結果および考察

3. 1 気泡間距離と限界薬径

種々の大きさならびに量の有機気泡体RB-1ないしRB-5を含有する爆薬の限界薬径を求めた結果をFig. 1に示す。横軸は爆薬の空隙率φを1から差し引いた値であり、次式で計算される。

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

ここで、 ρ 、 ρ_B および ρ_E はそれぞれ爆薬、気泡体およびエマルジョンマトリックスの密度をあらわす。図

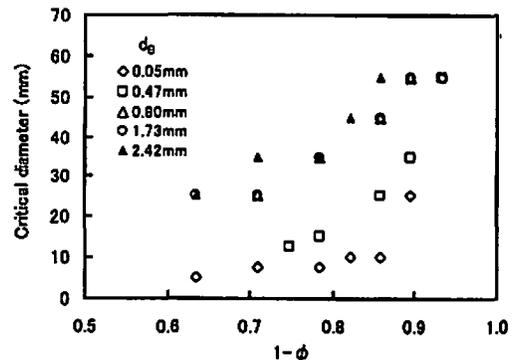


Fig. 1 Critical charge diameter of the emulsion explosives sensitized with resin balloons of different size and quantity.

中において d_B は気泡体の平均直径をあらわす。直径が0.05mm程度の小さな気泡体を含有する爆薬の限界薬径は、爆薬の空隙率が0.35(爆薬密度が約0.9g/cm³)ないし0.15(同じく約1.20g/cm³)の領域においては5mmないし10mmと比較的小さいが、空隙率が小さくなるにつれて、すなわち爆薬密度が大きくなるしたがって、急激に大きくなる傾向がみられる。同一の空隙率における限界薬径は、気泡体の大きさが大きくなるにしたがって大きくなる傾向にあり、しかも空隙率の変化に伴う限界薬径の変動の割合が小さくなる傾向がみられる。たとえば直径2.42mmの気泡体を含有する爆薬の限界薬径は、空隙率が0.15~0.35(爆薬密度として約0.9~1.2g/cm³)の範囲でほぼ直線的に増大する。なお、この気泡体を含有する爆薬は、空隙率を0.35より大きくしても(爆薬密度を0.9g/cm³よりも小さくしても)薬径20mmでは爆轟伝播しなかった。

Khasainov^{8),9)}は、限界薬径 d_{cr} が、気泡体表面での爆薬の反応速度 R_{surf} と爆薬バルクの反応速度 R_{bulk} と

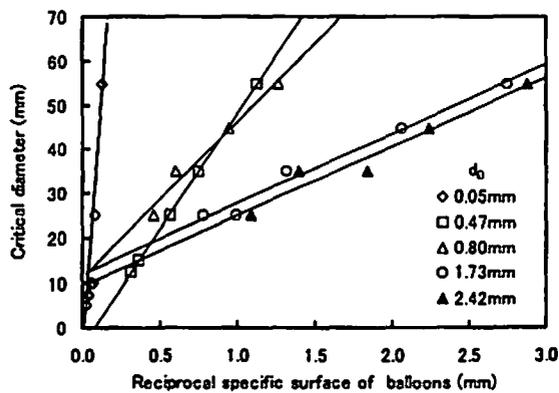


Fig. 2 Relation between critical charge diameter and reciprocal surface area of balloons included in the unit volume of emulsion explosives.

に反比例するとすれば、 $d_{cr} \propto 1/(R_{bulk} + R_{surf})$ となるとした。これは、限界薬径が爆薬の絶対反応速度の関数であるとする Cooper および Leiper¹⁰⁾ の考えに基づくものである。 R_{bulk} に比較して R_{surf} が大きい場合は、 $d_{cr} \propto 1/R_{surf}$ となり、その反応速度が圧力に依存しないとすれば、反応速度は単位体積中のホットスポットの表面積 A_s に比例する。すなわち $d_{cr} \propto 1/A_s$ となるとされた。われわれの行った実験結果において、単位体積の爆薬中に含まれる気泡体の表面積の逆数に対して限界薬径をプロットした図を Fig. 2 に示す。 Khasainov らは不均一系爆薬において、単位体積の爆薬中に含まれる気泡体の表面積に対して限界薬径をプロットすれば一本の直線で整理できることを示した。すなわち気泡体の容積率や大きさに関係なく、表面積で整理できることを示したが、われわれの実験によって得られた 5 種類の大きさの樹脂バルーンに対しては一本の直線関係では整理できず、しかも気泡体の直径が 0.47mm 以下の場合には直線がほぼ原点を通るのに対して、0.47mm を超える大きな気泡体の場合は原点を通らない。これは Khasainov らの行った整理が、直径 150 μ m 程度以下の比較的小さなガラスマイクロバルーン (GMB) を対象になされたのに対して、本実験で用いられたおよそ 0.5mm を超える大きさの樹脂バルーンはその表面積が小さく、 R_{bulk} を無視できないためと考えられる。

また、Lee ら¹¹⁾ は GMB を含有するエマルジョン爆薬の限界薬径が気泡体中心間距離に比例することを、平均粒子直径が 153 μ m 以下の GMB を使用した実験によって示した。同様にプロットされたわれわれの実験結果を Fig. 3 に示すが、限界薬径と気泡体中心間距離との間には比例関係が見られるものの、それらを直線近似した場合の横軸との交点はそれぞれの気泡体の直径にほぼ合致する。気泡体間の距離が大きくなる

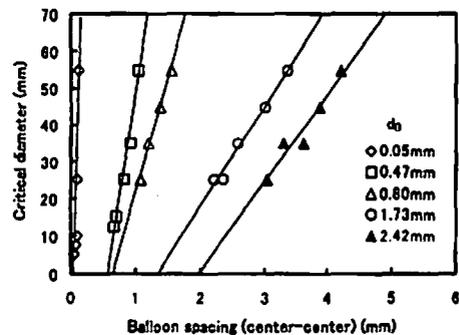


Fig. 3 Relation between balloon spacing (distance between balloons centers) and critical charge diameter.

ほど限界薬径が大きくなるが、爆薬の反応速度が気泡体の大きさに関係しないものとみなせば、限界薬径は反応する爆薬の長さ、すなわち隣り合う気泡体表面間どうしの距離に依存することが示唆される。そこで、比較的大きな気泡体を含有する爆薬の限界薬径を、以下に示すような簡単なモデルで考察した。

3. 2 モデル

試験に用いられた気泡体の大きさは、Table 1 に示されたようにそれぞれ分布をもっているが、ここでは爆薬中の気泡体がすべてその平均粒子径のもので構成され、それらが等間隔で均一に分散していると仮定する。爆薬中に分散した気泡体に衝撃波が入射した際にこれら気泡体がホットスポットとして作用する¹²⁾ と捉えたとき、単位体積の爆薬中に含まれるホットスポットの数は、爆薬の空隙率が同じならば気泡体の大きさ (直径) の 3 乗に反比例する。計算結果を Fig. 4 に示す。

試験を行った爆薬試料中の爆轟波面は、薬包周囲からの希薄波の影響によって、Fig. 5 のように湾曲した構造をしている¹³⁾ が、その爆轟波面近傍をモデル的に

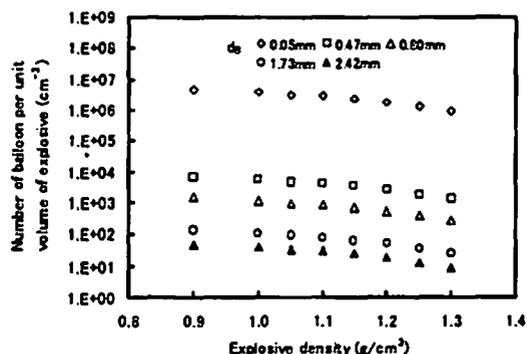


Fig. 4 The number of balloons of different size involved per unit volume of emulsion explosives having various densities.

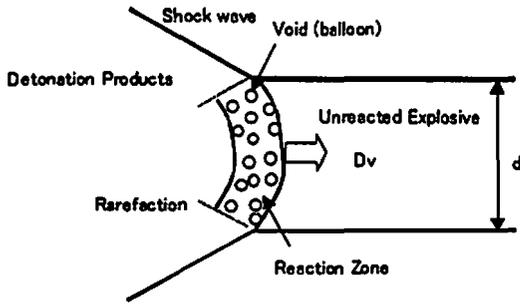


Fig. 5 Detonation model in the emulsion explosive sensitized with balloons as voids

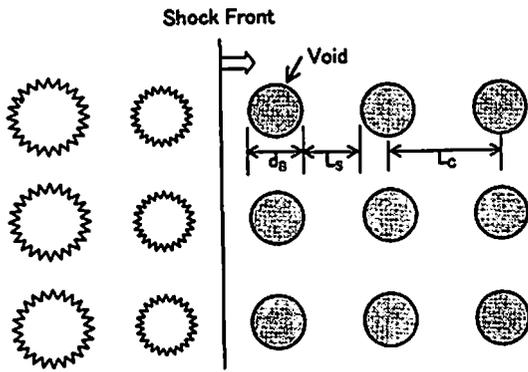


Fig. 6 Void arrangement model in forward and backward of the shock front in emulsion explosive

示したFig. 6のように、気泡体が均等に配置された爆薬中を爆轟波が進行する場面を考える。単位体積(1 cm³)の爆薬中に直径 d_B の気泡体 n 個が均一に分散しているものとし、それら気泡体の中心間距離を L_C 、表面間距離を L_S であらわす。爆薬の密度 ρ と空隙率 ϕ との関係は(1)式で与えられるが、 $\rho_B \ll \rho_E$ であるから(ρ_B が0.03~0.08であるのに対し ρ_E は1.39)、次式で近似できる。

$$\phi \approx 1 - \rho / \rho_E \quad (2)$$

一方、 L_C および L_S を、空隙率 ϕ と気泡体直径 d_B との関係であらわすと、それぞれ(3)および(4)式のようになる。

$$L_C = 0.905 d_B / \phi^{1/3} \quad (3)$$

$$L_S = L_C - d_B = (0.905 / \phi^{1/3} - 1) d_B \quad (4)$$

また、爆薬1 cm³中に含まれる気泡体の表面積 A_S は、(5)式で与えられる。

$$A_S = \pi d_B^2 \times n = 6 \phi / d_B \quad (5)$$

Fig. 6のように爆薬中の気泡体に爆轟波面が到達したのち、その気泡体がもとの大きさを有するホットスポットとして作用する¹⁴⁾ものとする。爆薬の燃焼反応

は気泡体の表面で始まり、ある誘導時間ののちに気泡体の表面に接する爆薬成分の反応が開始するが、反応の進行に伴ってホットスポットである気泡体が反応生成ガスとともに膨張し、反応波面がとなりあう気泡体に到達するものとする。ここで、反応の進行に伴う気泡体の大きさの変化は、気泡直径の2乗の変化率が時間に比例する、すなわち気泡表面積の変化割合が時間に比例するものとする。これと逆の現象は燃料油の液滴が燃焼する過程に対して知られており¹⁵⁾、この場合には燃料液滴の燃焼の進行とともに液滴の直径の2乗は時間に比例して小さくなる。ここでは、初期のホットスポットの大きさは気泡体の大きさと同じであると仮定し、もとの大きさが直径 d_B である気泡から出発した、ある時間 t におけるホットスポットの直径を B とすると、次式が成立する。

$$dB^2/dt = k \quad (6)$$

ここに、 k は定数である。この式は次のようにも書きかえられる。

$$dB/dt = k/2B \quad (7)$$

すなわち、ホットスポットの大きくなる速さはそれ自身の大きさに反比例する。これはまた、ホットスポット体積の増大する速さ、すなわち燃焼率はホットスポットの直径に比例することをあらわしている。すなわち(6)式と(7)式から次式が得られることで理解される。

$$d/dt(\pi B^3/6) = \pi kB/4 \quad (8)$$

次に、ホットスポットの温度が定常に達し周囲の爆薬が反応を開始するまでの時間を t_1 、そのあと次のとなりあうホットスポットに反応波面が到達するまでの時間を t_2 とすれば、時間 t_1 における B の変化は無視できる。また、 $B = d_B + 2L_S$ であるので、ホットスポットの燃焼時間 T は、

$$T = t_1 + t_2 = t_1 + 4(d_B \cdot L_S + L_S^2)/k \quad (9)$$

ホットスポットの表面温度がある定常温度になるまでの時間は、ホットスポットの表面積に比例すると考えられることから、 a を比例定数として、

$$t_1 = a \cdot L_S^2 \quad (10)$$

また、(9)式において L_S と d_B とはほぼ同じオーダーである。したがって、 m を定数として次式で近似できる。

$$T/L_S^2 = a + m \quad (11)$$

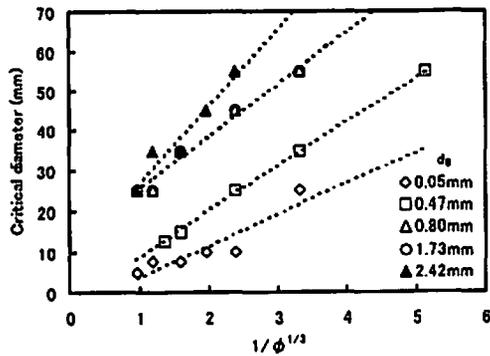


Fig. 7 Critical diameter of emulsion explosives sensitized with resin balloon of different sizes as a function of void volume fraction in the explosive

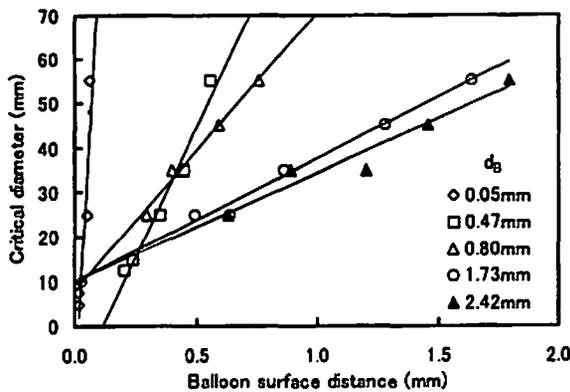


Fig. 8 Relation between critical charge diameter of emulsion explosives and the distance between balloon surfaces

これは、(6)式と同じ関係である。限界薬径 d_{cr} は気泡表面間距離 L_s を反応が伝播する速度に反比例するから

$$d_{cr} \propto T/L_s \propto L_s(a+m) \quad (12)$$

であらわされる。

3. 3 気泡の量および大きさと限界薬径の関係

爆薬中に分散する気泡体の大きさが一定で、その量すなわち空隙率が異なる場合には、(4)式から L_s は $\phi^{1/3}$ に比例するはずであるが、Fig. 7でそれが確認される。一方、(12)式における a と m は気泡の大きさによって異なるものの、限界薬径は気泡間表面距離 L_s に比例することが、Fig. 8で示される。

爆薬に含まれる気泡体の量、すなわち空隙率が一定である場合、気泡体直径が小さいときには(12)式において a が支配的となり、気泡体直径が大きいときには m が支配的になるものと考えられる。いずれにしても

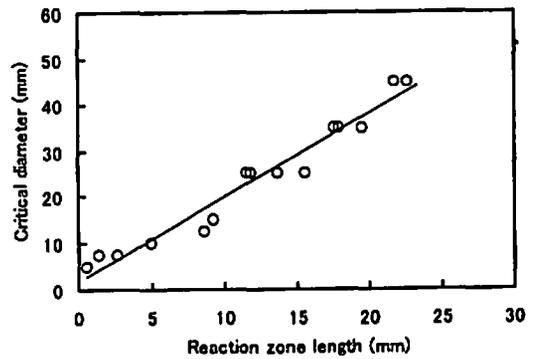


Fig. 9 Relation between critical charge diameter and the reaction zone length obtained from the charge diameter effect of the detonation velocity in emulsion explosives sensitized with different sizes of balloons

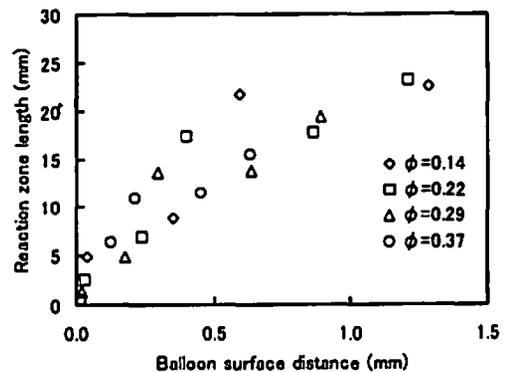


Fig. 10 A relation between balloon surface distance and the reaction zone length obtained for the emulsion explosives with various void fractions

限界薬径は気泡表面間距離との関係で整理することができる。

ここで、限界薬径と反応領域の長さについて触れる。限界薬径は反応領域の長さに比例すると考えられるが、次式における A を反応領域長さとして¹⁶⁾、前報⁷⁾において報告した値を採用し、この A に対して限界薬径をプロットした。

$$D/D_i = 1 - A/d \quad (13)$$

ここで D は爆薬直径 d における爆轟速度、 D_i は無限大薬径における爆轟速度である。Fig. 9にその結果を示すが、両者の間に良好な直線関係が認められ、上の考えを支持する結果となった。また、気泡表面間距離と反応領域の長さとの関係をFig.10に図示したが、異なる爆薬空隙率に対して両者はほぼ比例関係にあることがわかる。

さらに、エマルジョン爆薬の反応領域長さは、同じ

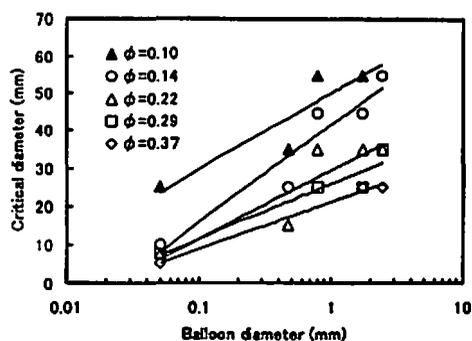


Fig. 11 Critical diameter of emulsion explosives with different void volume fraction as a function of void size

空隙率においては、気泡体直径の対数に比例することが前報⁶⁾で示された。爆薬の空隙率が一定の場合、(4)式から L_s と d_B は比例関係にある。したがって爆薬の限界薬径は気泡体直径の対数に比例することが予測されるが、Fig.11に示された結果はこれを裏づけるものである。ここでは、空隙率 ϕ が0.10~0.37における爆薬の限界薬径を、気泡体の直径の対数目盛りに対してプロットしたが、ばらつきは大きいものの直線性が認められる。

4. 結 論

平均粒子径が0.05mmから2.42mmの範囲にある、比較的大きな樹脂バルーンが添加されたエマルジョン爆薬の限界薬径を、気泡体の大きさや量の面から考察した。反応モデルとして、ホットスポットとしての気泡体の表面に接触する部分の爆薬が反応を開始し、反応生成ガスの増大に伴うホットスポットの大きさの成長が、気泡体表面積に比例するという仮定が設けられた。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 限界薬径は爆薬中に分散した気泡体の表面間距離に比例する。
- (2) 同一の爆薬密度では、気泡体直径が小さいほど気泡体表面積が大きく、気泡体間の距離も小さいことから、爆薬の限界薬径は気泡体表面で開始する反応速度によって支配される度合いが大きいものに対して、気泡体大きい場合はその表面積が小さく、爆薬の限界薬径は爆薬自体の反応速度に依存し、気泡体間距離が支配的となる。いずれの場合も限界薬径は気泡体の表面間距離によって決まる。
- (3) 爆轟速度の薬径依存性から求められた反応領域の長さとは限界薬径とは比例関係にある。

- (4) 気泡体の大きさが一定の場合には、限界薬径は爆薬の空隙率と相関する。
- (5) 爆薬の空隙率が一定の場合には、爆薬の限界薬径は気泡体直径の対数に比例する。

文 献

- 1) Edamura, K., Hirotsaki, Y., Sakai, H., Hattori, K., Proceedings of Journées Scientifiques Paul Vieille, pp. 253, SNPE, France (1984)
- 2) Houhe, C., Kondrikov, B. N., Annikov, V. E., Proceedings of the 26th International Pyrotechnics Seminar, China, pp. 52 (1999)
- 3) Leiper, G. A., Kerr, I. D., Kennedy, M., J. Energ. Mater, 7, 355 (1989)
- 4) Lee, J., Sandstrom, F. W., Craig, B. G., Persson, P. A., Proceedings of the Ninth Symposium on Detonation, pp. 573 (1989)
- 5) Yoshida, M., Iida, M., Tanaka, K., Fujiwara, S., Kusakabe, M., Shiino, K., Proceedings of the Eighth Symposium on Detonation, pp. 993-1000 (1985)
- 6) 服部勝英, 深津嘉章, 石田俊男, 森伸生, 酒井洋, 工業火薬, 45, 143 (1984)
- 7) 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)
- 8) Khasainov, B. A., Ermolaev, B. S., Presles, H. N., Proceedings of the Tenth Symposium on Detonation, pp. 749 (1993)
- 9) Khasainov, B. A., Ermolaev, B. S., Presles, H. N., Vidal, P., Shock Waves, 7, 89 (1997)
- 10) Cooper, J., Leiper, G. A., J. Ener. Mat., 7, pp. 405 (1989)
- 11) Lee, J., Persson, P. A., Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 15, 208 (1990)
- 12) Chaudhri, M. M., Almgren, L. A., Persson, A., Proceedings of the Tenth Symposium on Detonation, pp. 741 (1993)
- 13) 廣崎義一, 澤田徹哉, 加藤幸夫, 濱嶋英樹, 伊東繁, 火薬学会誌, 投稿中
- 14) Mader, C. L., Kershner, J. D., Proceedings of the Eighth Symposium on Detonation, pp. 42, (1985)
- 15) 熊谷清一郎, 「燃焼」, P. 170 (1976), 岩波書店
- 16) Eyring, H., Powell, R. E., Duffey, G. H., Parlin, R. B., Chemical Review, 45, 69 (1949)

Detonation behavior of emulsion explosives (III)

On the critical charge diameter of the emulsion explosives sensitized with relatively large voids

Yoshikazu HIROSAKI^{*}, Shinya TANAKA^{*}, Yukio KATO^{*},
and Shigeru ITOH^{**}

The critical charge diameters were determined for the emulsion explosives sensitized with different sizes and quantities of resin microballoons with average diameters between 0.05 mm and 2.42 mm. A reaction model was controlled based on the assumptions that the reaction in the explosive starts at the surface of the shock induced void followed by the progress of reaction in the bulk explosive to the adjacent void. The expanding rate of the void is assumed to be proportional to the square of the void diameter, the surface area of the void in other words. Linearity was observed between the critical diameter of the explosive and the void surface distance. For the same void volume fraction, the explosive sensitized with smaller void is rather governed by the reaction at the void surface due to its large surface area and shorter distance between next void. On the other hand, the critical charge diameter of the emulsion explosives sensitized with larger voids depends on the reaction rate in the bulk explosive. In both cases, the critical diameter is proportional to the void surface distance.

It was also shown that the critical charge diameter relates to the void volume fraction and it is proportional to the reaction zone length in the explosive that is derived from the charge diameter effect when the void size is constant.

(^{*}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)