

エマルジョン爆薬の銃撃感度試験（第1報）

統計解析による起爆限界の推定

廣崎義一*, 石田俊男*, 服部勝英*, 酒井 洋*

エマルジョン爆薬の製造工程中でもっとも危険性の高い乳化工程を想定した銃撃感度試験を実施した。固定された金属容器に装填された高温のエマルジョンに直径 20mm の鉄製平頭弾を種々の速度で衝撃させ、弾速と試料の爆否を観察した。弾速と爆発率の関係を一次回帰式で表わし、その統計的解析から信頼度95%で爆発率がゼロとなるような弾速範囲が推定された。

1. 緒言

鉱工業および炭鉱で用いられている爆薬は膠質ダイナマイト系から含水爆薬系へと徐々に推移しているが、これには含水爆薬が取り扱い上の安全性に優れていることが大きな要因となっている。すなわちピット掘り当て等の衝撃によって反応を生じないことが使用現場において強く要求され、含水爆薬がその目的に適うものであったりため、普及の推進力の一因となった。

使用時の衝撃に対する安全性が優れているということとはとりも直さず製造上においても同様であり、これは爆薬の製造メーカーにとって大きなメリットである。近年登場してきたエマルジョン爆薬は含水爆薬の中にあつて従来のスラリータイプのものに比べて、一般に感度がより低いにもかかわらず、スラリータイプと製造条件が異なるがために、その製造過程での安全性について詳細に検討することが必要とされた。すなわちエマルジョン爆薬は高温の酸化剤水溶液と乳化剤と油類の混合物に機械的エネルギーを加えて油中水型エマルジョンを作り、気泡保持剤を混和して爆薬とするわけであるが、乳化工程で加えられる剪断速度は一般にスラリータイプに比べて大きい。製造時の安全性を確保するためにはその剪断速度をあるレヴェル以下に抑える必要がある。おもな乳化方法にはプロペラを高速回転して剪断を加えるものや、突起物の備わった回転円板上に高温の酸化剤溶液および乳化剤と油類の混合物を同時に供給して乳化する方法¹⁾などがあるが、いずれもある大きさの剪断速度を与えることは共通しており乳化工程での安全性評価手段の一つとしては銃撃

感度試験が有効であろうと思われる。

乳化工程における安全性評価の目的としては大別して2つあり、第一は爆発を生じないような剪断速度を推定すること、第二は乳化機の一部が万一破損した場合、その破片が乳化機内壁に衝突しても爆発しないような回転速度を推定することである。後者の方が前者に比べてはるかに危険性の大きいことが実験的にも確認された²⁾ため、後者について弾丸衝突を利用したシミュレーション実験を行ない、その結果の統計的解析を試みたのでその手法を紹介する。

2. 実験

2.1 試料

試料としては2種類のエマルジョンを用いた。その組成を Table 1 に示す。A, B はそれぞれ鋭感剤として塩素酸ナトリウムおよび硝酸ヒドラジンを含むものであり、実験は乳化時の状態を想定しているため GMB 等の気泡保持剤は含有されていない。A, B の比重はそれぞれ約 1.40 および約 1.45 である。

2.2 弾丸および銃

弾丸は軟鋼製の直径 20mm, 長さ 20mm, 重量約 49g の円柱状平頭弾を用いた。銃はこの形状の弾丸を発

Table 1 Formulation of emulsion

(wt. %)

	Oxidizer	Water	Fuel***
A	83.6*	10.8	5.6
B	83.4**	11.1	5.5

* Ammonium Nitrate and Sodium Chlorate

** Ammonium Nitrate and Hydrazinium Nitrate

*** Emulsifier and Paraffin

昭和59年12月10日受理

*日本油脂(株) 武豊工場化学研究所
〒470-23 愛知県知多郡武豊町西門 82
TEL 05697-2-1221

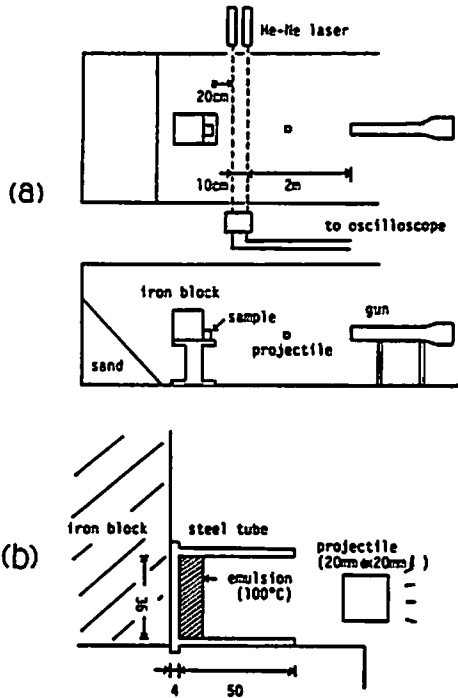


Fig. 1 (a) Experimental arrangement and (b) Sample configuration

射させるために設計・製作された試験銃である。発射薬は弾丸速度が小さいことから、自社製 NN シングルベース火薬を使用し、発射薬量の増減により弾速を変化させた。

2.3 実験方法

実験の概要を Fig. 1 (a) および (b) に示す。内径 36mm、内厚 3.5mm、長さ 50mm の鉄製円筒に厚さ 4

mm の鉄板を溶接し試料容器とした。試料エマルジョンを所定の深さまで充填し、 $100 \pm 5^\circ\text{C}$ に恒温したのち試料台に置いた。試料容器の背後には重さ 33kg の鉄製ブロックを接して置き、弾丸衝突時に試料が動かないようにした。恒温された試料が試料台に置かれたのち弾丸が発射されるまでに要した時間は約 1 分であり、その間の温度降下はほとんどなかった。弾丸が試料に衝突する直前に、10cm 間隔で発せられたヘリウム-ネオンレーザー（日本電気製 GLG5000 型）を横切る時間間隔をフォトセル-オシロスコープ系で計測し、弾速を求めた。

3. 実験結果

予備実験として試料エマルジョンの厚みを変えて試験した。試料 A については、5、10 および 15mm の厚みでそれぞれ 5、9 および 6 ショット、試料 B については 3、5、10 および 15mm の厚みでそれぞれ 9 ショットずつ実験を行なった。爆否の判定は、煙をとまう爆発音があり試料容器が破壊または大きく変形したものを「爆」、小さな爆発音と反応臭が認められたが試料容器には変形が認められなかったものを「半爆」、それ以外を「不爆」とした。結果を Table 2 に示す。また「爆」の例を Fig. 2 に示した。

同様な条件下での実験で、試料の厚みが薄くなるにつれて臨界弾速が小さくなるのが Napadensky⁴⁾ によって示されたが、Table 2 の結果からどの薬厚が最も感度が高いかを判定するにはデータが不足している。そこで本実験では最も低い弾速で「爆」あるいは「半爆」の出現した薬厚、すなわち A については 10mm、B については 5mm で試験を行なった。得られた試験データをそれぞれ 10m/sec 間隔の弾速範囲で整理し、Table 3 および Fig. 3 に示した。

Table 2 The effect of thickness of emulsion on explosion occurrence

Sample	A			B			
	5mm	10mm	15mm	3mm	5mm	10mm	15mm
projectile	139	88	124	108	105	108	122
velocity	△ 191	91	126	○ 117	○ 108	123	130
(m/sec)	△ 250	98	131	122	○ 115	125	130
and	△ 309	123	○ 176	○ 128	122	○ 133	136
results	△ 359	△ 128	○ 203	143	126	140	139
		141	○ 209	○ 152	142	○ 141	○ 163
		○ 169		190	○ 156	○ 143	○ 172
		○ 174		△ 203	169	○ 151	○ 179
		○ 190		211	○ 172	○ 154	182

○ : explosion

△ : partial explosion

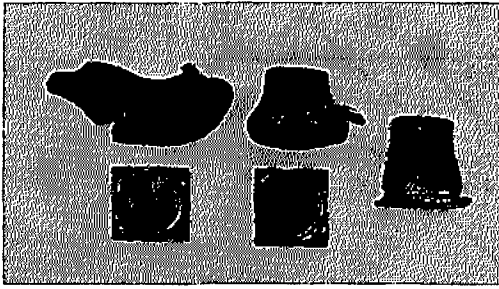


Fig. 2 Examples of steel containers after explosion

Table 3 Detonation probability and empirical logistic transformation λ for each projectile velocity interval.

velocity (m/s)	\bar{v} (m/s)	detonation probability		λ	
		A	B	A	B
50 — 60	55	0/14	0 %	—	—
60 — 70	65	1/17	5.9	—	—
70 — 80	75	0/15	0	—	—
80 — 90	85	5/21	23.8	0/11	0 %
90 — 100	95	5/22	22.7	1/15	6.7
100 — 110	105	3/11	27.3	3/10	30.0
110 — 120	115	3/14	21.4	6/15	40.0
120 — 130	125	4/8	50.0	7/19	36.8
130 — 140	135	6/9	66.7	7/14	50.0
140 — 150	145	4/5	80.0	4/9	44.4
150 — 160	155	7/8	87.5	6/8	75.0
160 — 170	165	2/2	100	5/8	62.5
170 — 180	175	—	—	6/7	85.7
180 — 190	185	—	—	4/4	100

4. 解析

Table 3に示されたように、各弾速区間の中心弾速でその区間の弾速を代表させ、その値を x m/sとする。またその区間での爆発率(半爆を含む)を y %とする。 x および y の回帰推定値はそれぞれ X および Y であらわすことにする。最小二乗法により弾速と爆発率との関係を(1)式で示される1次式で表わし、Fig. 3に図示

$$Y = a + bx \quad (1)$$

した。定数 a および b の値は Table 4 に記されている。

特定の弾速 x_0 における爆発率の観測値 y_0 の $(1-\alpha)$ %存在範囲は(2)式で示される双曲線の内側にある⁵⁾の

$$y_0 : (a + bx_0) \pm t_{\alpha} \sqrt{\left[1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}}\right] V_e} \quad (2)$$

で横軸に x を、たて軸に y をとって図に描き、 $y = y_0$ との2つの交点の x 座標をそれぞれ読みとれば、その区間がある爆発率 y_0 となる弾速 x_0 の範囲となる。ここで n は回帰推定式を求めるのに使われたデータの数、 t_{α} は自由度 $n-2$ の大分布値、 S_{xx} と V_e はそれぞれ(3)式と(4)式で表わされる。

$$x_0 : X_0 + \frac{g(X_0 - \bar{x}) \pm \sqrt{g^2(X_0 - \bar{x})^2 + (1-g)(1+1/n) \cdot S_{xx}}}{1-g} \quad (6)$$

エマルジョンAおよびBに対して上記の方法で得られた各統計的数値ならびに α を5%にとったときに爆発率ゼロとなるような弾速範囲の下限値 V_m を Table 4に示す。(6)式で計算された V_m と Fig. 3から得られた V_m とは当然ながら一致する。 V_m としてA、Bそ

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

$$V_e = S_e / (n-2) \quad (4)$$

ここで S_e は残差平方和である。

あるいはまた、回帰の逆推定を用いて計算によって求めることもできる。いま

$$g = \frac{t_{\alpha}^2 V_e}{b^2 S_{xx}} \quad (5)$$

とおき、 $X_0 = (y_0 - a) / b$ とすると x_0 は次式で与えられる2つの値の中間にある。

それぞれについて約37m/s、約53m/sが得られた。

以上のようにして信頼度95%で爆発率 y がゼロとなるような弾速範囲が推定されたわけであるが、爆発率ゼロというような極限付近を上述の方法で議論することに問題がないわけではない。そこで次式に示すよう

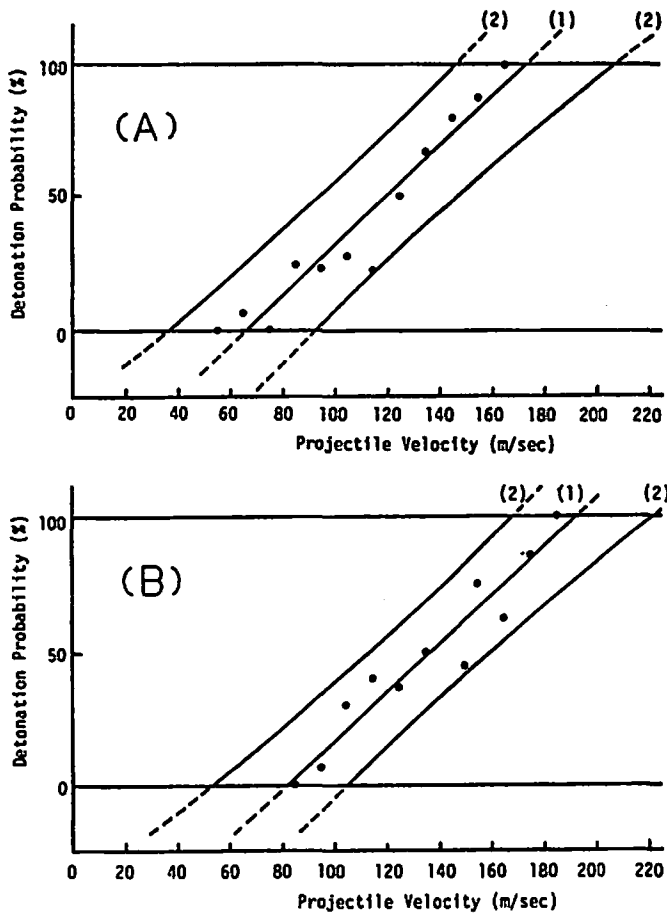


Fig. 3 Relationships between projectile velocity and detonation probability for emulsions A and B.

- (1) linear regression line
 (2) confidence interval with $\alpha = 5\%$

Table 4 Statistical values evaluated for emulsion A and B

	A	B
a	-62.8	-73.4
b	0.939	0.901
n	12	11
\bar{x}	110	135
S_{xx}	14300	11000
S_e	1096	674
V_e	109.6	74.9
$t_{5\%}$	2.228	2.262
V_m	36.9 m/s	53.2 m/s
V_m'	19.8 m/s	30.7 m/s

な経験ロジスティック変換⁶⁾の適用を試みた。

$$\lambda = \log \left(\frac{r+1/2}{m-r+1/2} \right)$$

ここで m は実験回数, r はそのうちの爆発した回数である。各弾速範囲について λ を計算した結果を Table 3 の右欄に併記しておいた。

x と λ との一次回帰式は, A については

$$\lambda = -2.554 + 2.039 \times 10^{-2} x \quad (7)$$

B については

$$\lambda = -2.655 + 1.903 \times 10^{-2} x \quad (8)$$

であった。さきと同様にして x に対する λ の存在範囲を $\alpha = 5\%$ に対して計算した結果を図示すると Fig. 4 のようになる。爆発率ゼロとなるような弾速 x_0 の存在範囲を推定するには m の値を指定しなければならないので, いま $m = 10$ とする ($r = 0$)。このとき (7) 式より $\lambda = \log(0.5/10.5) = -1.32$ となる。したが

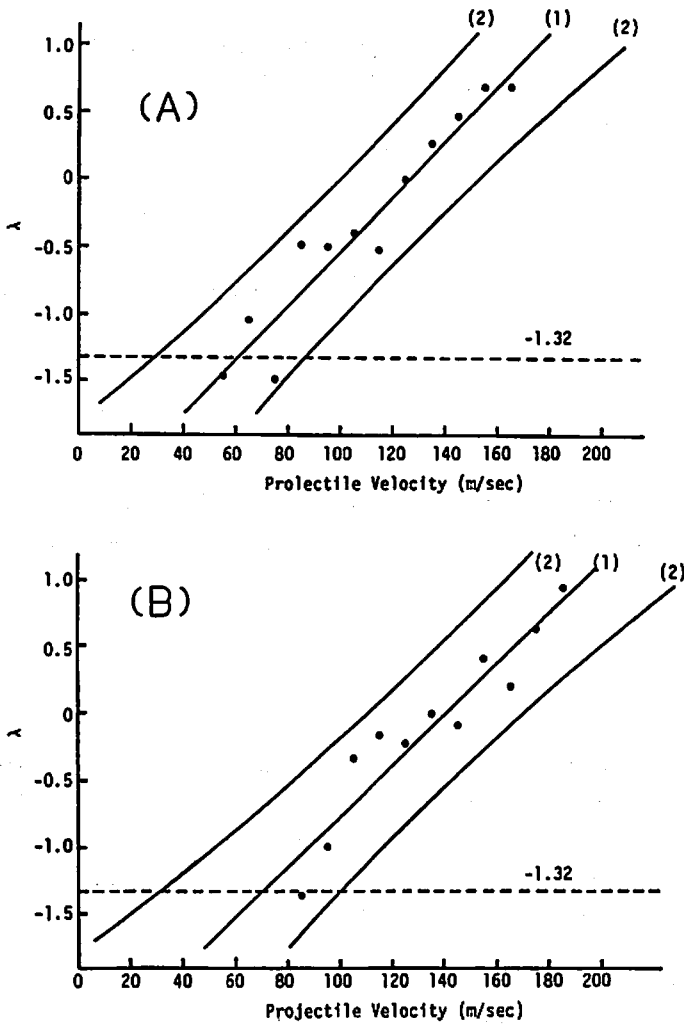


Fig. 4 Regression estimate for detonation probability by empirical logistic transformation.

- (1) linear regression line
- (2) confidence interval with $\alpha = 5\%$

って Fig. 4 において $\lambda = -1.32$ をあらわす破線との交点が、求めようとする弾速の区間を示すことになる。あるいは(6)式を用いて回帰の逆推定により計算で求めることもできる。こうして $\alpha = 5\%$ に対してそれぞれ求められた、爆発率ゼロとなるような弾速範囲の下限値を Table 4 の最下段に V_m' として併記した。 $m = 10$, $\alpha = 5\%$ の場合には、爆発率がゼロとなるようにするためには A については約 20m/s 以下、B については約 30m/s 以下にする必要がある。

5. 結 言

油中水型エマルジョンの乳化工程における危険性を想定した銃撃感度試験を実施し、種々の弾速範囲にお

ける爆発率が得られた。統計的解析を行なった結果、その条件下で弾丸が衝突した場合に信頼度 95% で爆発率がゼロとなるような弾速が推定された。

本実験では、弾丸が試料に衝突する角度すなわち弾丸の傾きについては定量的な観測を行っていない。試料エマルジョンの爆発率には、爆薬それ自身の爆発確率以外に弾丸の傾き角度の確率も寄与しているものと思われる。したがって本実験で得られた爆発率はそれら両者の複合された結果であることを理解しておかなければならない。

本報告で述べられた試験法は、乳化時の安全性評価として実施された種々の実験のうちの一つにすぎず、

単純化された試験である。実際には小型の乳化機を試作してシミュレート実験を行ない、ここに述べた統計的解析の結果を反映させて安全性評価に役立ててきた。爆薬の安全な製造ひいては安全な使用を確立するためには考えうるあらゆる手段を用いて評価しなければならない。

本研究をすすめるにあたり、慶応義塾大学理工学部管理工学科鷺尾泰俊教授の御指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- 1) 中野雅司, 火薬と保安, 18, 25 (1976)
- 2) 服部勝英他, 特開昭58-130188号
- 3) 廣崎他, 未発表データ
- 4) Hyla S. Napadensky, Proc. 4th Symp. on Deto., 437 (1965)
- 5) 奥野, 久米, 芳賀, 吉澤, “多変量解析法” 日科技連出版社 (1971)
- 6) D. R. Cox, “The analysis of Binary Data” ME THUEN & CO LTD, London (1970)

Projectile Impact Test of Emulsion Explosives (I)
Statistical analysis of modified projectile impact test

by Yoshikazu HIROSAKI*, Toshio ISHIDA*, Katsuhide HATTORI*,
and Hiroshi SAKAI*

The impact sensitivity tests were performed with the intent of simulating the hazardous conditions at the emulsifying process in emulsion explosive manufacturing. The bubble free emulsions at high temperature (100°C) were loaded in the bottomed steel containners to the given depth. They were impacted by 20mm-diameter flat-ended steel projectiles fired from a gun at various velocities. The results were statistically analyzed with respect to the projectile velocity and detonation probability to get the linear regression line. The projectile velocities at which detonation probability would be zero were estimated with certain confidences.

(*Taketoyo plant, Nippon Oil & Fats Co. Ltd., 82 Nishimon
Taketoyo-cho, Chita-gun, Aichi-ken, Japan)