

～100 μ s/div)およびデータレコーダ (AMPEX社製FR-2230, 80kHz)に記録し、パーソナルコンピュータ (日本電気社製PC9801VX2)により解析処理した。発生する爆発生成気体の挙動については、高速ビデオ

カメラ (コダック社製エクタブロ1000, 最高1000コマ毎秒)により観察した。画像解析はビデオシステム内蔵のX-Y方向可動のカーソル機能を用いた。

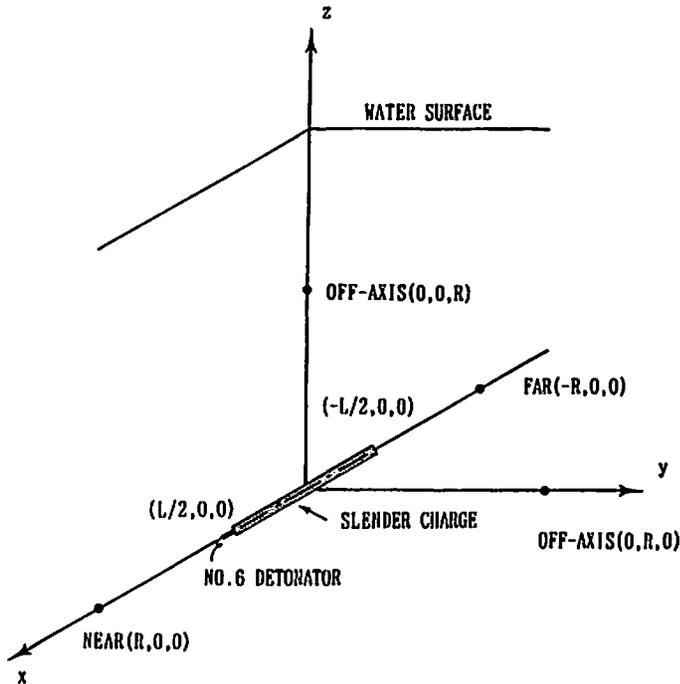


Fig. 1 A schematic of the experimental setup
L=charge length
R=distance of piezogages from the center of the charge

3. 実験結果

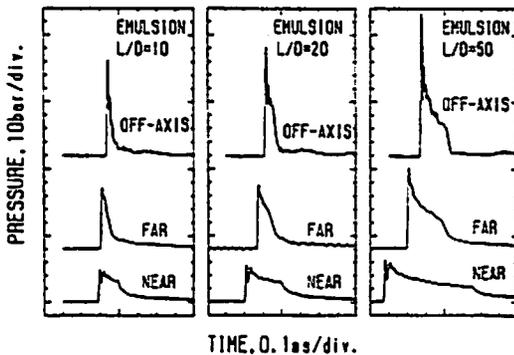


Fig. 2 Shock wave pressure-time curves for emulsion charge with $L/D=10$ (left column), $L/D=20$ (middle column), and $L/D=50$ (right column), 2.5 meter below the surface, 1.0 meter from the center of the charge.

Fig. 2に薬長薬径比 $L/D=10, 20, 50$ のエマルジョン爆薬の起爆側, 遠方側および半径方向での水中衝撃波形を示す。球状衝撃波と異なり圧力波の減衰部後半に肩(第2のピーク)を有する点が特徴的である。またピーク圧, 持続時間(ピーク値と第2ピークの時間幅)は, 各測定点により大きく変化している。ピーク値は起爆側より遠方側が大きく, L/D に対し大きな変化はない。一方半径方向側の圧力波形は, $L/D=10$ では球形爆薬のそれに近いが, L/D の増加により球対称衝撃波から大きく変化している。持続時間については, 起爆側でのそれは著しく長くなっている。

Fig. 3には導爆線(Detonating Cord)10, 20, 50 cmの結果を示す。持続時間については, エマルジョン爆薬と同様の傾向となっている。ピーク圧に関しては, 起爆側のピーク圧は遠方側のそれより高くなっているが, これは雷管の影響である。測定位置は本報告と異なるが, 文献7の結果にほぼ対応している。

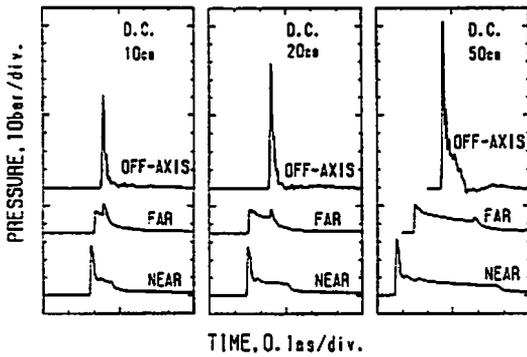


Fig. 3 Shock wave pressure-time curves for detonating cord (D. C.); length $L=10\text{cm}$ (left column), $L=20\text{cm}$ (middle column), and $L=50\text{cm}$ (right column), 1.5 meter below the surface, 1 meter from the center of the charge.

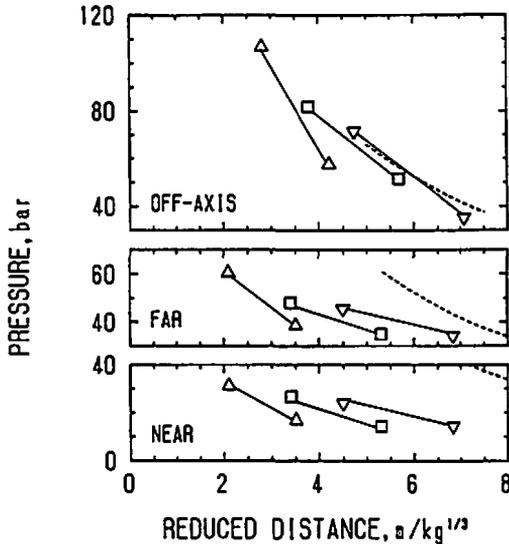


Fig. 4 Reduced distance v.s. peak overpressure at three directions: near end (bottom), far end (middle), and off-axis (top). the dashed line: $L/D=1$, ∇ ; $L/D=10$, \square ; $L/D=20$, and \triangle ; $L/D=50$.

Fig. 4はエマルジョン爆薬のピーク圧の換算距離による変化を示す。ここに、距離は爆薬表面から計っている。破線は $L/D=1$ の結果である。 $L/D=10$ の場合の半径方向側のピーク圧は、 $L/D=1$ の結果に漸近している。

Fig. 5にエマルジョン爆薬のインパルスの換算距離に対する関係を示す。積分の範囲は時定数を θ (衝撃波の大きさがピーク値の $1/e$ になるまでの時間)として、立ち上がりから 5θ まで行なった。

Fig. 6に導爆線の長さに対するピーク圧およびイ

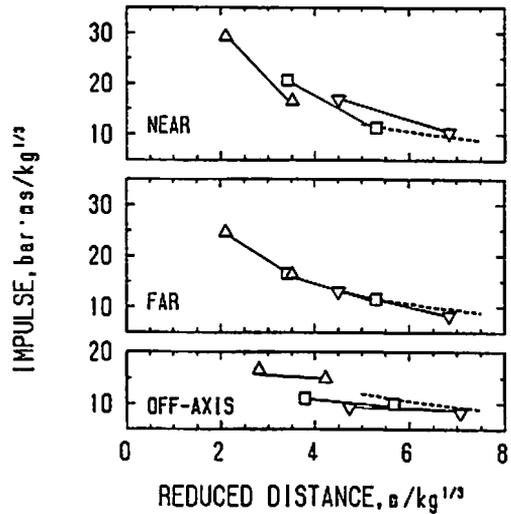


Fig. 5 Reduced distance v.s. reduced positive impulse at three directions: near end (top), far end (middle), and off-axis (bottom). the dashed line: $L/D=1$, ∇ ; $L/D=10$, \square ; $L/D=20$, and \triangle ; $L/D=50$.

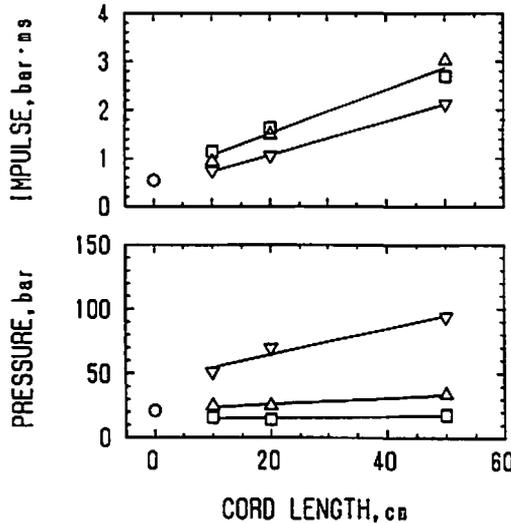


Fig. 6 Detonating cord length v.s. peak overpressure (lower)/positive impulse (upper) at three directions. \circ ; No. 6 detonator, \triangle ; near end, \square ; far end, ∇ ; off-axis.

ンパルスの結果を示す。距離は導爆線の幾何学的中心 (Fig. 1) から測っている。同図の \circ 図は6号雷管の値である。

Fig. 7に高速度撮影した爆発生成気体の時間変化を示す。起爆は図の左端から行なっている。通常の球形爆薬のガス形状から著しく異なっている。Fig. 8にエマルジョン爆薬 $L/D=10, 20, 50$ および導爆線 50cm の軸方向および半径方向 (爆薬の中央で測定) の爆

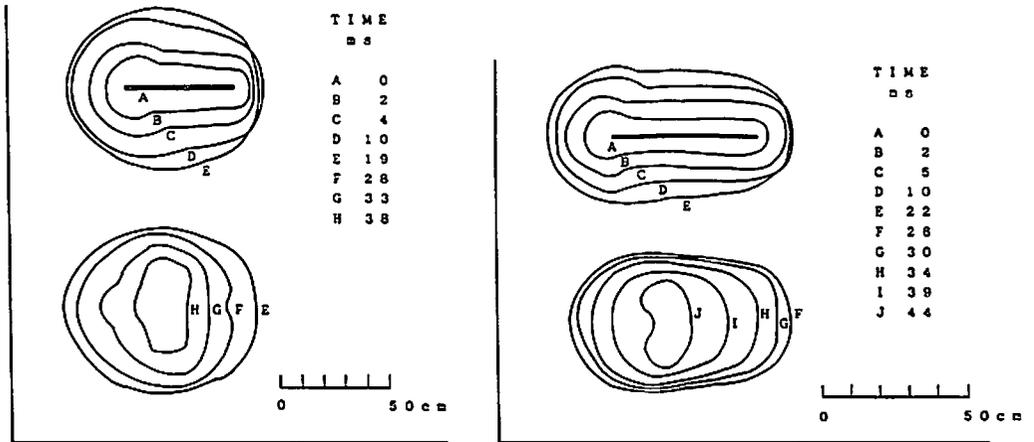


Fig. 7 Bubble shapes at several times for emulsion charge with $L/D=50$ (left column) and detonating cord 50cm (right column) during the expansion (upper) and contraction (lower) phase.

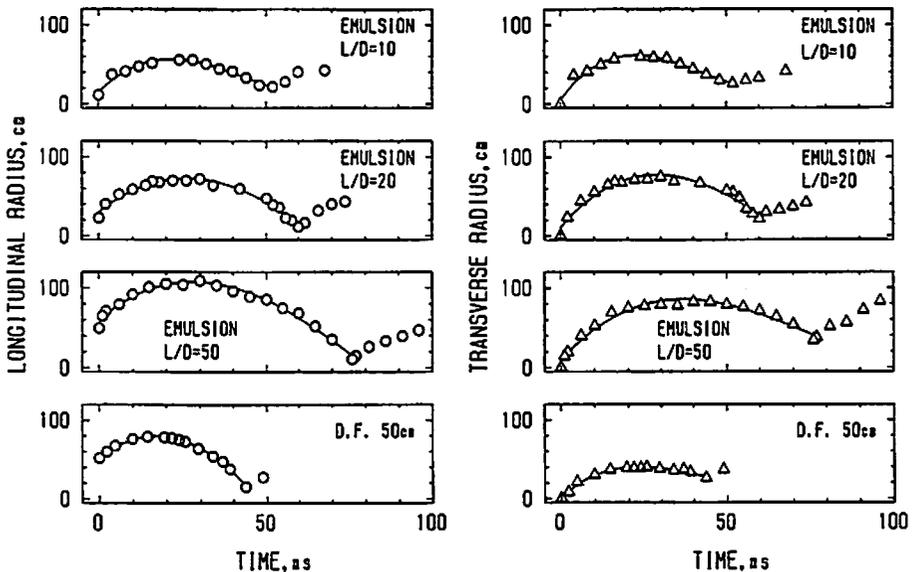


Fig. 8 Longitudinal and transverse radius of the gas bubble as a function of time, for emulsion charge of $L/D=10, 20, 50$ and detonating cord (50cm)

発生成気体の時間変化を示す。Table 1 に脈動周期(平均値)および同薬量の球形爆薬の脈動周期(比バブルエネルギーから算出した推定値)との比を示す。

4. 考察

4.1 ピーク圧およびインパルス

ピーク圧の大小関係は、Fig. 4 からわかるように、起爆側、遠方側、半径方向側の順に大きくなっている。遠方側が起爆側より大きいのは、爆轟波の進行方向の影響である。 L/D の効果については、同一換算距離でピーク圧は各方向とも L/D の増加により小さくなった。

線形音響理論³⁾では、起爆側と遠方側でのピーク圧の比 P_{FAR}/P_{NEAR} は、 $(D+C)/(D-C)$ となる。ここに D =爆薬の爆速、 C =水中の音速である。エマルジョン爆薬の場合、 $D=4.1\text{km/s}$ より、 $P_{FAR}/P_{NEAR}=2.15$ となる。実験結果ではこの比は L/D に対しほぼ一定であり、平均値として1.99(距離1.5m)および1.60(同1.0m)となった。爆薬からある程度離れば音響理論の予測値は実験結果に一致する。

半径方向の圧力については、 L/D が小さく距離が遠くなるにつれて、 $L/D=1$ の結果に近づいている。このことは、半径方向側のピーク圧は爆源からある程度

Table 1 Results of pulsation period for underwater explosion

CHARGE	WEIGHT	LENGTH	L/D*1	Tb	Tb/Tbs*2
	g	cm		ms	%
EMULSION*3	7.5	2.6	1	48.1	100
	22.7	3.7	1	71.1	100
	51.9	5.0	1	93.3	100
	8.7	10	10	49.1	96.1
	17.6	20	20	60.1	93.5
	43.5	50	50	76.7	88.2
DETONATING CORD*4,*5	0.98	10	—	28.9	—
	1.96	20	—	32.1	—
	4.90	50	—	40.2	—

*1 L/D=Ratio of length to diameter

*2 Tb=Bubble period for cylindrical charge

Tbs=Bubble period for the equivalent spherical charge

*3 2.5meter below the surface

*4 1.5meter below the surface

*5 estimated from the measured value of 9.8 g / m

離れば、近似的に球対称爆薬のそれに近くなることを示す。

インパルスについては、大小関係はピーク圧の場合と反対に、起爆側>遠方側>半径方向側の順になっている。また同一換算距離でのL/Dの効果はあまりはつきりせず、特に遠方側での測定点は重なっている。インパルスでは、L/Dの効果より測定点の位置の影響が顕著である。

4.2 持続時間

持続時間（ピーク値と第2ピークの時間幅）は測定点により特徴的な傾向を示す。相対的には、起爆側、遠方側、半径方向側の順に短くなっている。音響理論では、衝撃波の持続時間（T）は、爆薬の爆速をD、水中の音速をC、爆薬長をLとして

$$T_{NEAR} = L(1/C + 1/D) \quad (1)$$

$$T_{FAR} = L(1/C - 1/D) \quad (2)$$

となる⁵⁾。薬量22.6kg、長さ7.5m (L/D=150)の結果では音響理論の結果と実験結果は非常によく一致している。水中の音速C=1.5km/sおよび爆速を使用して、横軸に(1)(2)式により算出した持続時間、縦軸に実測した持続時間をプロットした結果をFig. 9に示す。

遠方側の結果は理論値より小さくなっているが、これは波形の第2ピークが明瞭でないために生じた誤差であろう。起爆側の場合には、第2ピークがはっきりしているため平均値として理論値に対応した結果となっている。文献5、7の導爆線の結果は、音響理論より短い持続時間を得ている。本報告の場合も同様の傾向が認められるが、圧力ゲージの応答性（~100

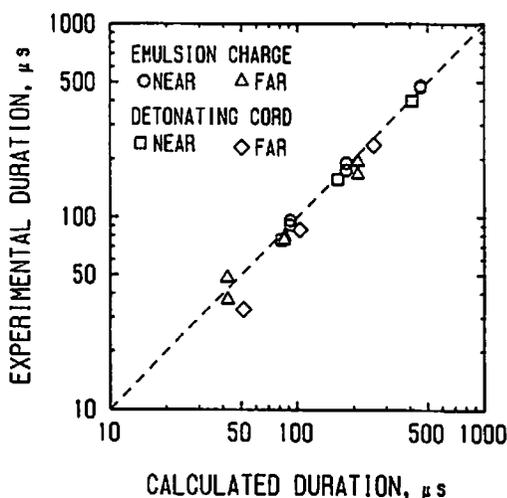


Fig 9 Calculated duration v. s. experimental duration. Calculated results are based on the acoustic theory (equation of (1), (2) in section 4. 2). ○; emulsion (near). △; emulsion (far). □; detonating cord (near). ◇; detonating cord (far).

kHz), および測定距離の誤差（~1 cm）を考慮すると、理論値にはほぼ一致していると考えられる。

4.3 爆発生成気体の脈動

ガス径の時間変化については、定性的には急激に膨張し比較的緩やかに収縮する点が特徴的である。またこれらの膨張・収縮過程の他に、時間に対し比較的大きさが変化しない一定領域が存在している。これは特に半径方向側 (transverse) において顕著である。導

爆線の場合には、半径方向の大きさは導爆線長によらずほぼ一定となった。これは線状爆薬の特徴であろう。最大膨張時に、 $L/D=20$ 、50の気泡は楕円体形であるが、 $L/D=10$ の場合は比較的球形に近い。

脈動周期については、薬長薬径比の増加により著しく短くなり、 $L/D=10$ 、20および50に対しそれぞれ $L/D=1$ の96.1%、93.5%および88.2%になった。球対称衝撃波/球形気泡の関係式により衝撃エネルギーおよび気泡エネルギーを算出することは可能であるが、 L/D が大きい場合には、それらの物理的意味はあまり明確ではない⁶⁾。これらのことから、柱状装薬の場合には生データである脈動周期により検討することが妥当である。あるいは文献6のように $L/D=6$ と決めてエネルギーを評価する方法が適当であろう。

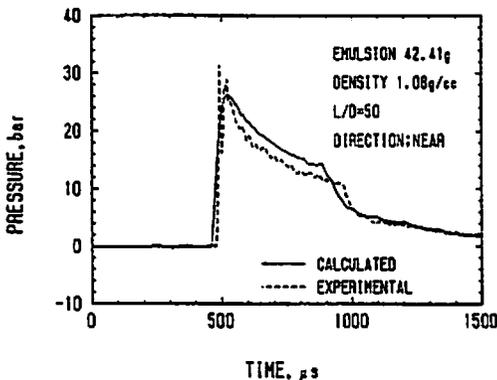


Fig. 10 Comparison of the calculated result with that of experiment for shock wave pressure-time curve for emulsion charge with $L/D=50$ measured at detonator near end, 1 meter from the center of the charge.

4.4 数値解析結果との比較⁹⁾

Fig. 10に水中衝撃波の数値解析結果を対応する実験とともに示す。計算にはMacNeal-Schwendler社の爆発衝撃解析コードPISCES-2DELK(バージョン4, レベル29)を使用した。爆薬の形状は全長50cm, 直径1.0cm, $L/D=50$ の円柱形爆薬である。PMMAと水の衝撃圧縮特性はほぼ同じなので、計算ではPMMA管は水に置き換えた。また6号電気雷管は計算では無視した。爆発生成気体の状態式では、KHT式のチャップマンジュゲ点からの等エントロピー膨張の結果を変換したJWL式を使用した。計算のメッシュは爆薬、水ともオイラーセルである。

Fig. 10は起爆側での計算結果であるが、実験値とは比較的よく一致している。計算値では、ピーク圧力は実験値よりやや小さく、第2ピークの位置は実験よ

り速く到達している。計算値の持続時間が短くなっているのは理想爆速 (5.4km/s)を使用したためである。数値計算において爆速の効果を考慮すれば、計算結果は実験結果をほぼ説明する。4.1で述べた起爆側と遠方側の圧力比 P_{FAR}/P_{NEAR} は、1.35 (距離1m)となり、実験値 (1.60) より小さくなった。これは計算値の遠方側のピーク圧が低めに評価されているためである。

爆発生成気体の数値解析結果については、数値解析では時刻 ~ 1 msまでしか計算していないため、時刻 $t=1$ msにおけるガス体の寸法の計算値および $t=1\sim 2$ msにおける実測値を示す。軸方向径については計算値63.6cm (1ms)に対し実測値65cm (1ms), 71cm (2ms)。半径方向に関しては計算値19.3cm (1ms)に対し実測値14cm (1ms)および20cm (2ms)となった。撮影速度が1000コマ毎秒なので正確に同時刻での比較にはなっていないが、両方向の結果は比較的よく一致している。

5. まとめ

薬長薬径比 L/D の影響を調べるために、換算距離 $2\sim 8$ m/kg^{1/3}の範囲で $L/D=1, 10, 20$ および50の円柱形爆薬の水中爆発を行ない、起爆側、遠方側および半径方向側での圧力測定および高速度撮影 (最大1000コマ毎秒) により検討した。

ピーク圧に関しては、半径方向側で $L/D=10$ の結果が $L/D=1$ の結果に近く、 L/D が大きくなるとピーク圧は $L/D=1$ の結果より小さくなった。起爆側および遠方側のピーク値は半径方向側より小さく、またそれらのピーク圧の比 P_{FAR}/P_{NEAR} は音響理論の予測値に一致した。

インパルスに関しては、 L/D の効果ははっきり現れず、 L/D の効果より方向性の効果が大きくなった。

持続時間については、 L/D の増加に対し各測定方向で持続時間が長くなった。音響理論からの予測値との比較では、起爆側の結果はほぼ妥当な結果を得たが、遠方側の場合には、実験値は理論値より小さくなった。

脈動周期については、 $L/D=10, 20, 50$ に対し、同薬量の球形爆薬の脈動周期のそれぞれ96, 94, 88%程度に減少した。

文 献

- 1) R. H. Cole, Underwater Explosions, Princeton University Press (1948), P. 248.
- 2) M. M. Swisdak, Jr., Explosion effects and properties: part I explosion effects in air, NSWC/WOL/TR75-116, Naval Surface Weapon Center, White Oak, Silver Spring, MD, October (1975).
- 3) 中山良男他, 野外実験における円筒形鋳造TNT

- 爆薬の爆風, 日本熱流体工学会論文集, 5, 52 (1990).
- 4) 中山良男他, 超高圧起爆法による推進薬の爆発, 工業火薬, 50, 88(1988).
- 5) 文献1, Chapter 7, Section 7.6., p.248-255.
- 6) G. Bjarnholt, Suggestions on Standards for Measurements and Data Evaluation in the Underwater Explosion Test, Propellants Explos., 5, 67 (1980).
- 7) 細谷文夫 他, “柱状装薬の水中爆発の性質と伝爆性の推定”, 工業火薬, 50, 579(1989).
- 8) M. Yoshida, et. al., Detonation Behavior of Emulsion Explosives containing Glass Micro balloons, in 8th. Symp. (International) on Detonation, p.993(1985).
- 9) 中山良男他, “細長比の大きいエマルジョン爆薬の爆発による水中衝撃波の数値解析”, 化学技術研究所報告投稿中.

Underwater Explosion of Cylindrical Charge with Large Length to Diameter Ratio

by Yoshio NAKAYAMA*, Mitsuaki IIDA*, Takehiro MATSUNAGA*
Senzo OINUMA*, Katsumi TANAKA* and Kazumi TANAKA*

Underwater explosions with length to diameter (L/D) ratio of 10, 20, and 50 are studied experimentally to understand the effect of the L/D ratio both on the underwater shock wave properties (peak pressure, positive impulse, duration) and on the pulsation behavior of detonation products.

In the range of reduced distance, $2-8 \text{ m/kg}^{1/3}$, the peak pressure off the axis with small L/D ratio (≤ 10) is equal to the value with $L/D=1$ and with the larger L/D ratio, the peak pressure off the axis is lower than the value for $L/D=1$. The effect of L/D ratio is observed less clearly in the values of positive impulse, because of the stronger effects by the measurement locations (near end, far end, and off-axis). For the duration, the larger the L/D ratio, the longer the duration, especially at the detonator near end. The pulsation periods of the detonation products decrease rapidly with increasing L/D ratio for the same amount of spherical charge.

(*National Chemical Laboratory for Industry, 1-1 Higashi, Tsukuba 305, Japan.)