

コンポジション・ビー (Comp. B) の爆轟

藤原修三*, 角館洋三*, 吉田正典*
青木勝敏*, 田中克己*, 日下部正夫*

円板状の鋳造した Comp. B (直径: 125mm, 肉厚: 10mm, 密度: 1.66g/cm^3) の爆発伝播状況を高速度コマ撮りカメラで観測した。起爆はC型雷管を使用し, 爆薬の円周側面上の4~12点を同時起爆した。C型雷管だけを用いた起爆の場合, $4.2\sim 4.4\text{ km/sec}$ と $2.5\sim 2.6\text{ km/sec}$ の爆速を示す二つの型の爆発が観測された。最初, 前者が生じ $6\mu\text{sec}$ 後に後者に転移する。

ブースターを使用した強い起爆の場合, $7.1\sim 7.5\text{ km/sec}$ の定常な高速爆轟が観測されるが, 時に最初, 4.8 km/sec の低速爆轟が生じ, 後, 7.9 km/sec の高速爆轟へ転移する現象も観測された。転移で生じた高速爆轟波は低速爆轟波面の背後をも伝播していることが確かめられた。このことは「低速爆轟は部分反応により維持されている。」という考えを支持するものである。

1. 緒言

ニトログリセリンゲルには二つの爆発伝播の型が存在すること, つまり, 爆速 $7\sim 8\text{ km/sec}$ の高速爆轟 (以下HVDと記す。)と 2 km/sec 前後の低速爆轟 (以下LVDと記す。)が古くから知られている。一般に液体のLVDは数百メガパスカル ($10^6 P_a \approx 10$ 気圧) 程度の低衝撃圧力で容易に起爆され得ることから保安上重要な問題となり, 1960年代から米国のBureau of Mines研究所を中心として系統的な研究が行なわれ, LVD機構そのものがかなり明らかにされてきた¹⁾²⁾。

コンポジション・ビー (以下Comp. Bと記す。)のような固体鋳造爆薬はLVDを誘起すること自体が困難なせいか, 液体と比べてLVDに関する研究報告例は少ない。Badaytseva³⁾は, 内径, 肉厚, 長さが各々, $10\sim 15\phi$, $10\sim 13$, 200 mm という厚肉鋼管を容器とし弱く起爆した場合, Comp. B (ただしRDX/TNT=50/50のもの), 鋳造TNTに対して, 各々, 2.0 , 2.3 km/sec の伝播速度を示す定常なLVDを起こせることに成功しており, 鋳造系のLVD heavy confinementが必要であると述べている。

我々は爆薬を利用した磁場濃縮の研究を昭和52年から今日まで継続しており, 金属管の周囲の中空円筒状爆薬で管を円形状にかつ対称性よく収縮させることが磁場濃縮度を高めるために重要なことから, 円形状に収縮する爆轟波の伝播状況を高速度カメラで調べた。

その結果, Comp. Bに関して興味ある結果が得られたので報告する。

2. 実験方法

実験に使用したComp. Bは直径, 厚さ, 各々 125ϕ , 10 mm の円板状でその密度は約, 1.66 g/cm^3 である。この円板をFig. 1に示すように, 辺長が $150\times 150\text{ mm}$, 厚さ 5 mm のメタクリル板上に置き, 爆薬の円周側面上の4~12点を同時起爆する。起爆にはC型雷管を使用した⁴⁾。より強く起爆する場合には 9.5 mm 径のテトリルペレット (密度: 1.6 g/cm^3 , 重量約 1 g) をブースターとして用いた。

爆発波面の撮影はFig. 1に示すように, 高速度カメラの光軸に対して 45 度傾斜した平面鏡を使用し, 像を 90 度回転させて行なった。これは, 爆発室内の観測窓を, 爆発時に破砕されて飛翔してくるメタクリル板破片等から保護するためである。高速度カメラはCordin社

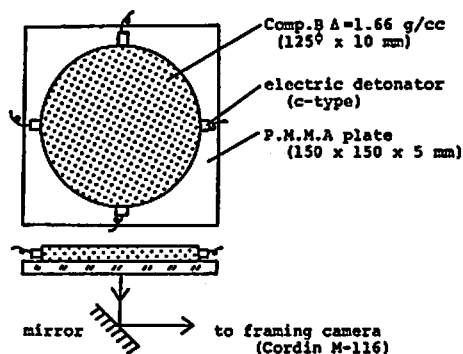


Fig. 1 Experimental arrangements.

昭和58年6月21日受理

*化学技術研究所保安環境化学部
〒305 茨城県筑波郡谷田部町東 1-1
TEL 0298-54-4788, 4789

製のM-116型カメラを使用した。このカメラは回転平面鏡式のもので撮影には現象との同期が必要であり、このため、C型雷管のような、起爆時間誤差のなるべく少ない起爆具が必要である。また、流し写真とコマ撮りの両方が可能であり、後者では、35mmフィルム

上に一度に26コマの連続撮影ができる。撮影速度は百万コマ/秒の条件で行なった。Fig.1のような方法では被写体を外部から照明しないのでComp. Bの爆発波面の自発光を撮影できる。

3. 実験結果と考察

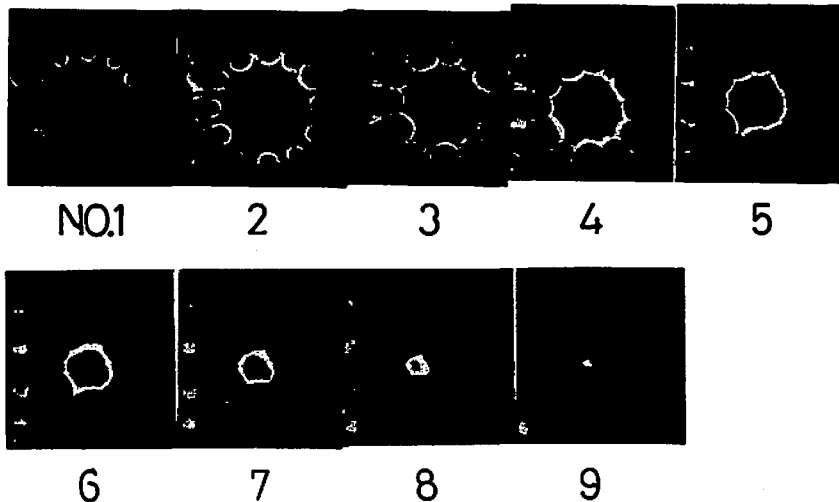


Fig. 2 Framing camera records of high velocity detonation in Comp. B. frame interval: $1\mu\text{sec}$. The charge was strongly initiated at 12 points.

Fig. 2の写真は起爆点数が12でプースターによる強い起爆の場合の撮影例である。起爆点を中心とし円状に広がる爆発波が生じ、近隣の波面と相互に衝突した後、概略円形状の、一つに連なった波面(連接波面)を形成し、中心に向かって収縮していく様子がわかる。この実験では、写真の左下方向の一点で低速の爆発が生じており、特にNo.4のコマ以後、波面が左下方向で歪になっている。また、先に報告⁴⁾したように、C型雷管の起爆の斉発性に $0.5\sim 0.8\mu\text{sec}$ 程度のバラツキがあるので連接波面は正円状になりにくいものと思われる。

爆薬の中心をとる水平、垂直方向線上での向い合った波面間の距離をフィルム上で測定し、これを、コマのNo.つまり、時間に対してプロットしたのがFig.3である。各測定点を最小二乗法で直線近似すると垂直、水平方向に対して式(1)、(2)が得られる。

$$(1) L_v = 147.4 - 14.21t \quad (r=0.999, N=9)$$

$$(2) L_h = 155.4 - 14.99t \quad (r=0.998, N=8)$$

L_v, L_h : 距離 mm, t : 時間 μsec , r : 相関係数, N : 測定点数。

式(1)、(2)の時間: t の係数の $1/2$ が平均爆速を与える。よって式(1)、(2)より、垂直、水平方向の速度として、 $D_v=7.1\text{km/sec}$, $D_h=7.5\text{km/sec}$ が得られる。

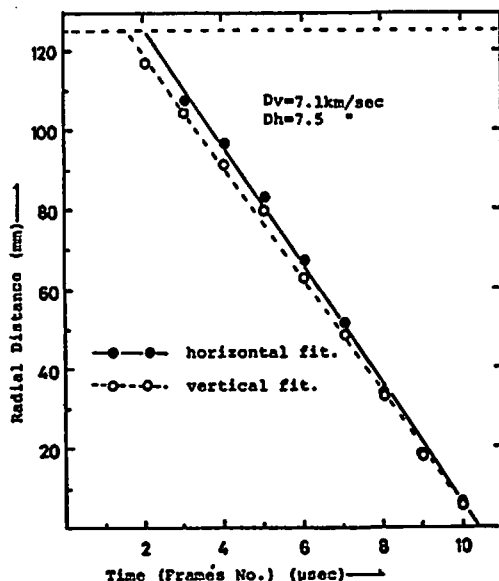


Fig. 3 Space and time relations corresponding to Fig. 2. Least squares fits give the linear equations, " $L_v=147.4-14.21t$ " for vertical fit, and " $L_h=155.4-14.99t$ " for horizontal fit. L_v, L_h : radial distance between the opposite fronts (mm). t : time (μsec). D_v and D_h are the obtained velocities for vertical and horizontal directions, respectively.

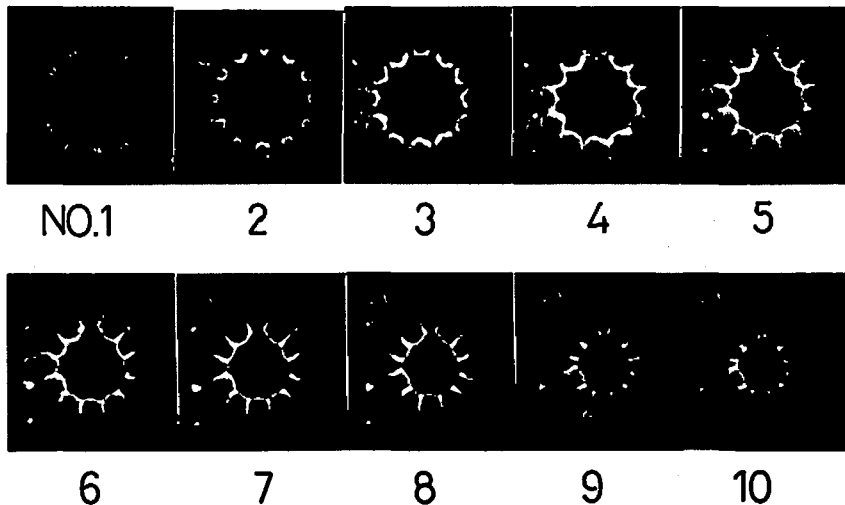


Fig. 4 Framing camera records of low and intermediate velocity detonations in Comp. B. frame interval: $1\mu\text{sec}$. The charge was weakly initiated at 12 points. IVD to LVD transition occurs at No. 6 frame.

密度が 1.66g/cm^3 の Comp. B の理想爆速は $7.75 \pm 0.05\text{ km/sec}$ であり⁵⁾、一方、薬径 10mm のものは Deal⁶⁾ によれば 7.62 km/sec であるから、 D_0 の値は測定誤差 ($2\sim 3\%$ 、速度にして $0.15\sim 0.225\text{ km/sec}$) を考慮しても低すぎる。この理由は現在のところよくわからない。

Fig. 4 の写真は起爆点数: 12, C型雷管のみによる起爆の例であり, Fig. 5 は前回と同様にして波面間の距離を時間に対してプロットしたものである。No. 6 コマめ ($6\mu\text{sec}$) で明らかに測定点をフィットした直線が折れ曲がる。この転移点までの直線式は最小二乗法により式(3), (4)で与えられる。

$$(3) L_v = 129.2 - 6.75t \quad (r=0.997, N=5)$$

$$(4) L_h = 138.2 - 8.61t \quad (r=0.996, N=5)$$

また転移点後は式(3)', (4)'で与えられる。

$$(3)' L'_v = 119.8 - 5.17t \quad (r=0.999, N=5)$$

$$(4)' L'_h = 112.7 - 4.98t \quad (r=0.998, N=5)$$

上式から転移前の速度は $D_0=4.4, D_h=3.4$, 転移後, $D'_0=2.6, D'_h=2.5\text{ km/sec}$ と求められる。Fig. 4 の写真からわかるように、爆薬の中心点をとる垂直方向線上の上部の爆発は最初から遅い伝播速度を示しており、この速度を 2.6 km/sec とし、下部の爆発のそれを D とすると、 $(D+2.6)$ の値が式(3)の t の係数: 6.75 と一致するはずである。よって、 $D=4.2\text{ km/sec}$ となり、転移前の水平方向の速度: $D_0=4.4\text{ km/sec}$ とほぼ一致する。 $2.5\sim 2.6\text{ km/sec}$ の爆発は、伝播速度の比較から、Badaytsev³⁾ らの観測した LVD と同類のもの

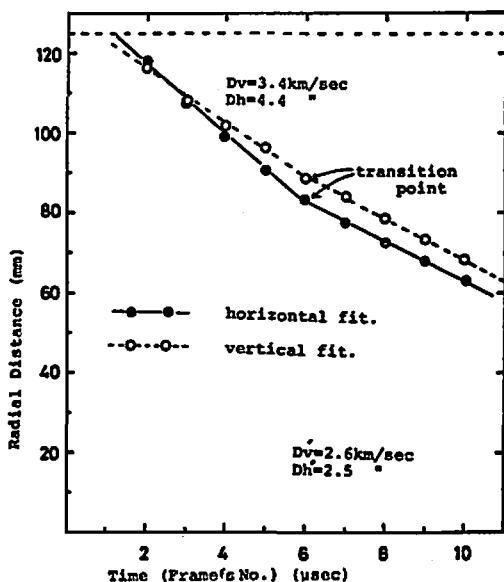


Fig. 5 Space and time relations corresponding to Fig. 4. $L_v = 129.2 - 6.75t$, $L_h = 138.2 - 8.61t$ (before transition) $L'_v = 119.8 - 5.17t$, $L'_h = 112.7 - 4.98t$ (after transition)

のと思われる。

以下、説明の簡略化のため、本実験で観測された爆発伝播速度が $2.5\sim 2.6\text{ km/sec}$ のものを LVD, $4.2\sim 4.4\text{ km/sec}$ のものを IVD (Intermediate Velocity Detonation), 7 km/sec オーダーのものを HVD と呼ぶこ

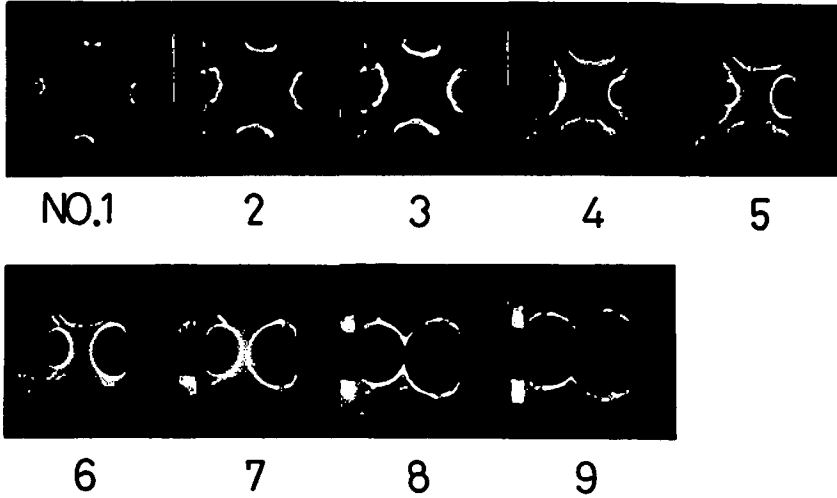


Fig. 6 Framing camera records of intermediate and high velocity detonations in Comp. B. frame interval: $1 \mu\text{sec}$. strongly initiated at 4 points.

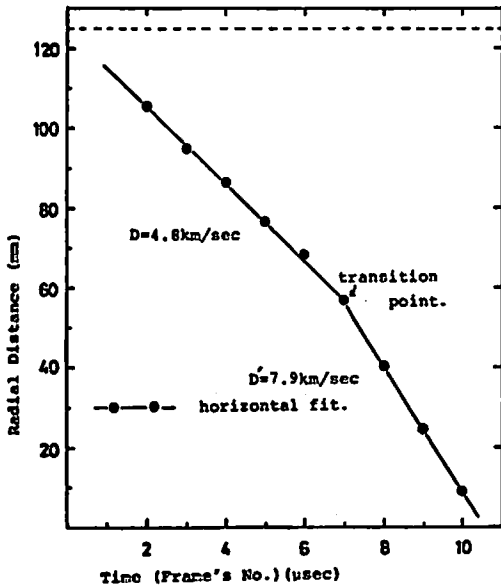


Fig. 7 Space and time relations corresponding to Fig. 6. $L_h = 124.4 - 9.55t$ (before transition) $L_h = 167.7 - 15.88t$ (after transition)

とにする。

Fig. 6 はブースターを使用し、4点で起爆した例であり、Fig. 7 は、Fig. 6 の爆発の水平方向の波面間の時間、距離をプロットしたものである。Fig. 3, 5 の例と同様にして求めた直線式は、転移前が式(5)、転移後が式(5)'である。

$$(5) L_h = 124.4 - 9.55t \quad (r=0.999, N=6)$$

$$(5)' L'_h = 167.7 - 15.88t \quad (r=0.999, N=4)$$

Fig. 6 では実際に撮影された写真の初期のコマをいくつか省略しており、Fig. 6 の No. 1 の 1 コマが Fig. 7 の $4 \mu\text{sec}$ の位置に対応する。Fig. 6, 7 の場合、最初、起爆点から中心に向かい、約 $70 \div 2 = 35\text{mm}$ の距離までは式(5) で与えられる $D_h = 4.8\text{km/sec}$ の爆発が伝播している。しかし、Fig. 6 の写真の No. 3, 4 コマにおいて、高速 ($D'_h = 7.9\text{km/sec}$) で伝播する新しい波面が、写真の水平方向を低速で伝播する波面中に生じている。転移前の爆発はその伝播速度から考えて、前に述べた IVD に相当するものであろう。Holland⁷⁾ からも単結晶 PETN を衝撃起爆したとき、HVD に転移する前の $D = 5.56\text{km/sec}$ (HVD: 8.28km/sec) という、低速の爆発を観測している。我々の実測した IVD と同種のものか否かはわからないが、HVD の 67% の速度で伝播する中間域の爆発が PETN にも存在するようである。

Fig. 6 の写真は他にも極めて重要な事実を示している。すなわち、No. 4 コマ以後、新しく生じた HVD 波面が IVD 波面の背後を伝播していることである。このことは、IVD 波面の背後には HVD が伝播できるに足るエネルギーが残存していることを示すもので、IVD そのものが Comp. B の部分反応で維持されているものと考えられる。液体の LVD に関し、Wooten⁸⁾ Cowperthwaite⁹⁾ は、部分反応を仮定し、LVD の伝播速度、圧力等を計算し、実験と良好一致を得ている。Comp. B の LVD, IVD も部分反応により維持されているものと考えて HVD に対する反応率の推定を行なう。

爆発速度： D はそのときの反応熱を Q とすると、略 \sqrt{Q} に比例する^{10) 11)}。Comp. BのHVD速度を7.62/sec⁶⁾として、LVD, IVDのHVDに対する速度比からHVDに対する反応率を求めると、2.5~2.6km/secのLVD, 4.2~4.8km/secのIVDに対し、各々、11~12、30~40%となる。速度に関しては部分反応の仮定で一応の説明はできるが、何故、2つのタイプの部分反応が生じるのかという疑問が残る、今後とも研究を行なう必要がある。

別の考え方として、Comp. BのIVDは、衝撃起爆におけるBuild-up過程¹²⁾ではないかという想定もできる。すなわち、Comp. B中に入射した衝撃波が部分反応により加速された後、正規のHVDに転移するまでの過程である。密度、1.70g/cm³(本実験のComp. Bはこの密度の98%に相当)の衝撃波速度(U_s)と粒子速度(U_p)の関係が $U_s=3.03+1.73U_p$ (km/sec)という式を用い¹³⁾て、IVDの速度、 $D=U_s=4.2\sim 4.8$ km/secに相当する衝撃波圧力： P を求めると48~83 kb (4.8~8.3 GPa)となる。密度が1.72g/cm³(97%に相当)のComp. Bに対して、HVDに転移するまでに衝撃波が進行する距離： L と衝撃波圧力(P)との関係は式(6)が実験式として求められている¹⁴⁾。

$$(6) L=2100P^{-1.34} \quad (L: \text{mm}, P: \text{kb})$$

前記の48~83 kbを式(6)に代入し、 $L=11.7\sim 5.6$ mmが得られる。我々の用いたComp. Bは、文献のものより密度が2~3%低くかつ、二次元の伝播条件であるが、4~5 km/secの衝撃波に対して10mm程度のBuild-up領域が存在するものと考えられる。しかしながら、本実験結果の示すIVDは、Fig. 5で約20mm、Fig. 7では35mmもの長距離にわたって伝播している。また、Fig. 1に示すように、我々の実験条件はComp. Bの上面が開放(裸薬)なので、上部表面から生じる希薄波の影響を受けて、薬長にして10mmも伝播すれば衝撃波は急激に減衰する。以上の理由から、IVDをBuild-up過程と解釈するのも困難と思われる。

Comp. Bは鋳造TNTを重量で約40%含有する爆薬である。Price¹⁵⁾が報じているように、鋳造TNTは鋳造時の条件により起爆性、伝爆性等が強く影響を受けるのでComp. Bも同様の性質をもつものと考えられ、同一品質のものを得ることが実験を継続するうえ

で重要である。本実験で使用したComp. BはA社製のものである。B社製のは、少し実験条件が異なるが、LVD, IVDを示さなかった。鋳造条件を変えて、いかなる条件のとき、このような現象を示すようになるかを解明すること、何故、二つの型の低速伝播形態、(部分反応型)が生じるのかを解明するのが今後の研究課題である。

最後に、本稿をまとめるにあたり、多大の援助を受けた、佐々木、故 富樫の両女史に謝意を表す。

文 献

- 1) 疋田強, 工業火薬協会誌, 30, 267, 1969
- 2) 田中克己, 米田罔昭, 疋田強, 藤原修三, 椎野和夫, 日下部正夫, 水島容二郎, 「低速爆轟の研究」, 火薬工業技術奨励会, (1973), 日本産業火薬会資料編集部
- 3) N. V. Badaytsev, B. N. Kondrikov and V. F. Tyshevich, Vzryvnoe Delo, No. 68-25, 215 (1970)
- 4) 青木勝敏, 角館洋三, 藤原修三, 日下部正夫, 工業火薬協会誌, 41, 112, (1980)
- 5) 藤原修三, 日下部正夫, 工業火薬協会誌, 40, 379, (1979)
- 6) W. E. Deal, Phys. Fluids, 1, 523, (1958)
- 7) T. E. Holland, A. W. Campbell and M. E. Malin, JAP, 28, 1217 (1957)
- 8) D. C. Wooten, M. Cowperthwaite and D. C. Erlich, AFOSR-TR-72-1716, (1970)
- 9) M. Cowperthwaite and D. C. Erlich, AFOSR-TR-74-0801, (1974)
- 10) H. Eyring, R. E. Powell, G. H. Duffey and R. B. Parlin, Chem. Rev. 45, 69, (1949)
- 11) D. Price, Chem. Rev. 59, 801, (1959)
- 12) A. W. Campbell, W. C. Davis, J. B. Ramsay and J. R. Travis, The Physics of Fluids 4, 511, (1961)
- 13) T. R. Gibbs and A. Popolato, LASL Explosive Property Data p. 20, University of California Press, 1980
- 14) ibid p. 19,
- 15) D. Price, 5th Symposium on Detonation, p. 207, ONRD, 1970,

Experimental Study of Detonation Propagation in Composition-B.

by Shuzo FUJIWARA*, Yozo KAKUDATE*, Masatake YOSHIDA*,
Katsutoshi AOKI*, Katsumi TANAKA* and Masao KUSAKABE*

A disk charge of composition-B, with a diameter of 125 mm, a thickness of 10 mm and a density of 1.66 g/cm³, was simultaneously initiated at multi-points of its lateral surface with electric detonators. The luminous fronts of the converging detonation wave were observed by use of a high speed framing camera. It was found that composition-B has three propagation modes of detonation, i. e., low velocity detonation (LVD, $D=2.5\sim 2.6$ km/sec), intermediate velocity detonation (IVD, $D=4.2\sim 4.8$ km/sec) and high velocity detonation (HVD, $D=7.1\sim 7.5$ km/sec). IVD to HVD transition was observed under a certain condition and the occurred HVD could propagate in the reacted zone where IVD had passed by. This fact supports the idea that LVD (IVD) is sustained by the partial reaction of the explosives.

(*National Chemical Laboratory for Industry, Safety and Environmental
Chemistry Division.

Yatabe, Higashi 1-1, Tsukuba, Ibaraki)
