

超高压起爆法による推進薬の爆発

第1報 爆風圧について

中山良男*, 吉田正典*, 角館洋三*, 飯田光明*
 石川 昇*, 加藤一成**, 酒井 洋**, 薄葉 州*
 青木勝敏*, 桑原仁太郎*, 田中克己*, 田中一三*
 藤原修三*

平面爆轟波発生装置を用いてアルミ板を飛翔衝突させて15—20GPaの入射圧を加え、コンポジット推進薬を爆発させた。使用した薬量は、34kg, 11.1kg, 86.4kgおよび260kgの4種類であり、爆風圧の測定範囲は換算距離で2.3~44.9m/kg^{1/3}である。その結果、超高压の衝撃を受けた推進薬は爆轟せず、衝撃圧により細かな破片となって燃焼しながら放射状に飛散した。また、ビエソ圧力素子による爆風圧の測定結果から、推進薬の爆風圧はTNTほど大きくはないがブースタ爆薬より大きく、衝撃超高压を受けた推進薬の一部は分解、発熱反応して燃焼し爆風圧に寄与することがわかった。

1. 緒言

ロケット推進薬の需要が増えるにしたがい、その爆発事故等による災害危険性の評価が緊急の課題となっている¹⁾。一般に、可燃性ガスや火薬類、爆発危険性物質の爆発災害の規模を評価するには、TNT換算薬量が用いられる。これはTNTを基準爆薬としてある当該物質の爆風圧に等しい爆風圧を発生させるTNT薬量もしくは当該物質とTNTとの薬量比で示される。したがって、ロケット推進薬の爆発災害の規模を評価するには、推進薬の爆風圧を測定してTNT換算薬量を推定することになる。

コンポジット推進薬の爆発災害を評価するための研究としてはソフィー計画 (PROJECT SOPHY)²⁾がよく知られている。この計画では本報告とはほぼ同一組成の推進薬を使用し、薬径 D = 60inch および 72inch、薬長薬径比、L/D = 3 の推進薬の爆轟性を検討している。その結果 D = 72inch の推進薬は爆轟し、D = 60inch のそれは不爆であった。また爆轟の有無にかかわらず、発生する爆風圧から求めた推進薬の TNT 換算薬量は、換算距離 ~ 3m/kg^{1/3} で 200%、遠方

の換算距離 $\geq 15\text{m/kg}^{1/3}$ で 120% に減少すると報告している。

我が国においては、通商産業省主催の火薬類保安技術実験において1984年から86年迄の3ヶ年にわたり、コンポジット推進薬の大薬量衝撃感度試験が行われた。この実験では、大薬量のコンポジット推進薬に超高压力の衝撃波を入射させ、ビエソ圧力素子により爆風圧を測定し、推進薬の衝撃感度に関するデータを得ている。

本報告は、上述の火薬類保安技術実験において3ヶ年にわたり行われた実験³⁾をまとめたものである。ここでは、超高压の衝撃を受けたコンポジット推進薬の爆発状況を高速度カメラで撮影した結果、およびビエソ圧力素子による爆風圧の測定結果について述べる。

2. 実験の内容と方法

実験場は1984年度と86年度が日出生台、85年度が岩手山陸上自衛隊演習場である。

供試火薬類の種類、数量を Table 1 に示す。コンポジット推進薬の組成は、末端水酸基ポリブタジエン (HTPB) 14%、アルミニウム粉18%、過塩素酸アンモニウム (AP) 68% であり、初期密度は1.762~1.766g/cm³ である。試料推進薬はいずれも硬質塩化ビニル管 VU200 あるいは VU400 に注型したものである。

試料の形状は、84年度が試料薬径 200mm、薬長と薬径の比 L/D = 3、85年度が試料薬径 200mm と 400mm で L/D = 1、86年度が試料薬径 400mm、L/D = 3

昭和62年12月25日受理

*化学技術研究所 安全化学部
 〒305 茨城県つくば市東1-1
 TEL 0298-54-4793

**日本油脂株式会社武豊工場 化学研究所
 〒470-23 愛知県知多郡武豊町字西門 82
 TEL 05697-2-1221

Table 1 Experimental conditions

Experimental Number	Weight		Initiation system**	Diameter mm	Length mm	L/D	Scaled HOB*** m/kg ^{1/3}	Atmospheric pressure mbar
	Booster* kg	Propellant kg						
841	4.07	dummy	A	200	600	3	0.676	959
842	4.07	34.1	A	200	600	3	0.224	959
843	4.07	dummy	B	200	600	3	0.676	960
844	4.07	34.0	B	200	600	3	0.224	960
851	2.18	dummy	C	200	200	1	0.449	990
852	2.18	11.1	C	200	200	1	0.192	988
853	8.64	dummy	D	400	400	1	0.529	986
854	8.64	86.4	D	400	400	1	0.188	990
861	8.63	dummy	D	400	1200	3	0.868	935
862	8.63	260.0	D	400	1200	3	0.179	935

*Booster : Main charge is 50mm thick PL (PETN/TNT=50/50)

**Initiation system

	Plane wave generator	flyer plate	
A	Explosive lens	flat plate	φ200 × t5
B	Explosive lens	flat plate with groove	φ200 × t5
C	Mouse trap type	flat plate	φ200 × t5
D	Mouse trap type	flat plate	φ400 × t5

***HOB ; Height of Burst

である。試料の重心から地表面までの換算高さは、約 $0.2\text{m/kg}^{1/3}$ となるように木製装薬台の高さを調節した。

起爆方法は、いずれも平面爆轟波発生装置(爆薬レンズあるいはマウストラップ)により高性能ブースタ爆薬(ペントライト, PETN/TNT=50/50)を平面爆轟させ、その爆轟生成ガスによりアルミニウム板(板厚5mm)を飛翔させ、試料推進薬に高速(約3000~4000m/s)で衝突させた。また、84年度においては衝撃圧をさらに高めるために、アルミニウム飛翔板は平板のほか7本の溝付き平板も使用した(実験番号84-3および84-4)。この起爆システムの使用により、試料中には15~20GPaの超高压衝撃波が入射すると推定される。この詳細な起爆システムの構成・性能については、文献(4)を参照されたい。また、密度、形状が試料推進薬と同一の不活性ダミー推進薬についても実験を行い、起爆部のブースタ爆薬のみによる爆風圧を計測し、ダミー推進薬の物理的な破壊状況も調べた。推進薬のTNT換算薬量を求めるために、TNT爆薬の爆発実験を行い爆風圧を測定した⁵⁽⁶⁾。TNT爆薬の爆源形状および起爆法等の詳細については爆発実験の報告書⁷⁾を参照されたい。

推進薬の爆発反応がどの程度進行しているかを定量的に把握するためにビエゾ圧力素子による爆風圧の測定を行った。使用した素子は、PCB社製の137A11, 101および106Bである。プローブ137A11は爆源近傍

用(4m~10m)で地上高は30cmであり、プローブ101及び高感度の106Bはそれより遠方で地上高は100cmである。素子保持部は、架台に取り付け、架台の固定には3本のワイヤーロープを使用した。プリアンプ(PCB480D)とバッファアンプを圧力素子架台の近くの地中に埋設し、また波形記憶装置まで接続する同軸ケーブル類も大部分を地中に埋設した。波形記憶装置群をGP-IB計測バスを通じてマイクロ・コンピュータにより制御し、A/D変換した爆風圧データはコンピュータの外部記憶装置に保存した。使用機器類の詳細は報告書⁸⁾を参照されたい。

3. 実験結果と考察

3.1 推進薬の爆発状況

推進薬の爆発状況について高速度カメラ(ナック社製E-10)による撮影を行ったので、その結果について以下に示す。撮影方法の詳細については爆発実験の報告書を参照されたい。Fig. 1に推進薬86.4kg(L/D=1, D=400mm)の爆発経過の連続写真を示す。起爆後、非常に光輝の強い円錐状の火炎が形成される。続いて(1)に示すように、円錐頂点の部分が上方に膨張し始め、14.5ms後には(2)の21.8ms後のマスに示したように細長い形状になる。60ms程度経過すると、ガス塊から砕けた推進薬の破片が燃焼しながら放射状に飛び散っている様子が観察できる。これ以降は(4)のような形状のガス塊となり、890ms後に消炎した。この結果から、超高速の飛翔体の衝突により推進薬は

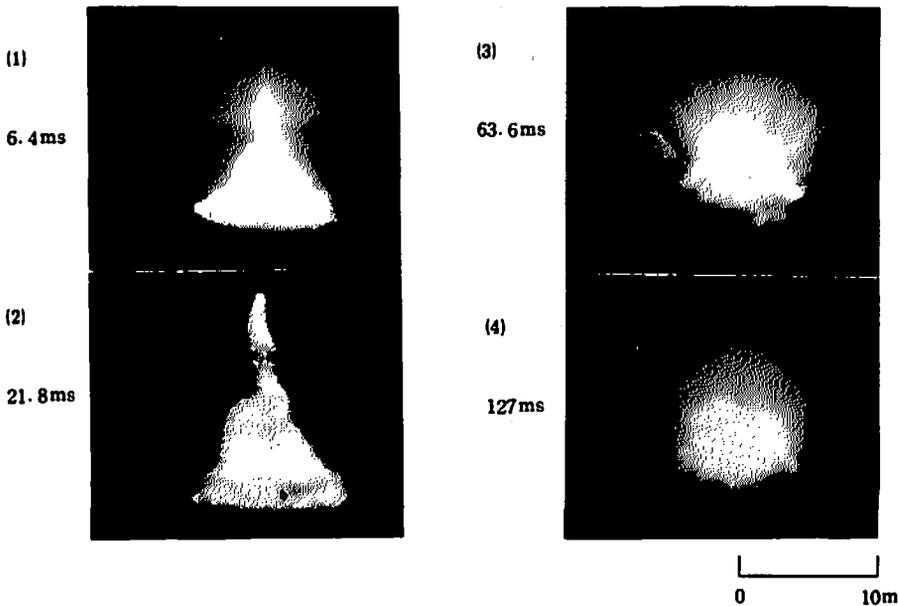


Fig. 1 Sequential photographs of the explosion of composite propellant (weight of propellant=86.4kg, L/D=3, D=400mm)

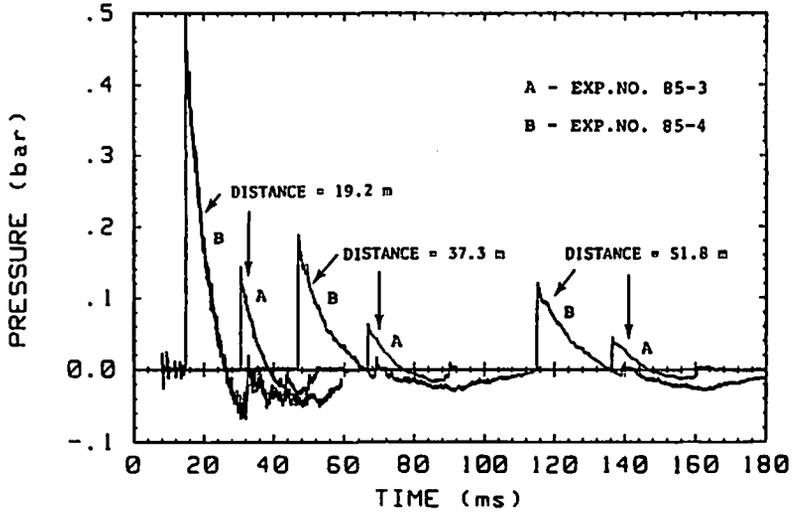


Fig. 2 Pressure-time profiles by the explosion of composite propellant ($L/D=1$, $D=400\text{mm}$,
 A : booster 8.64kg
 B : booster 8.64kg+propellant 86.4kg)

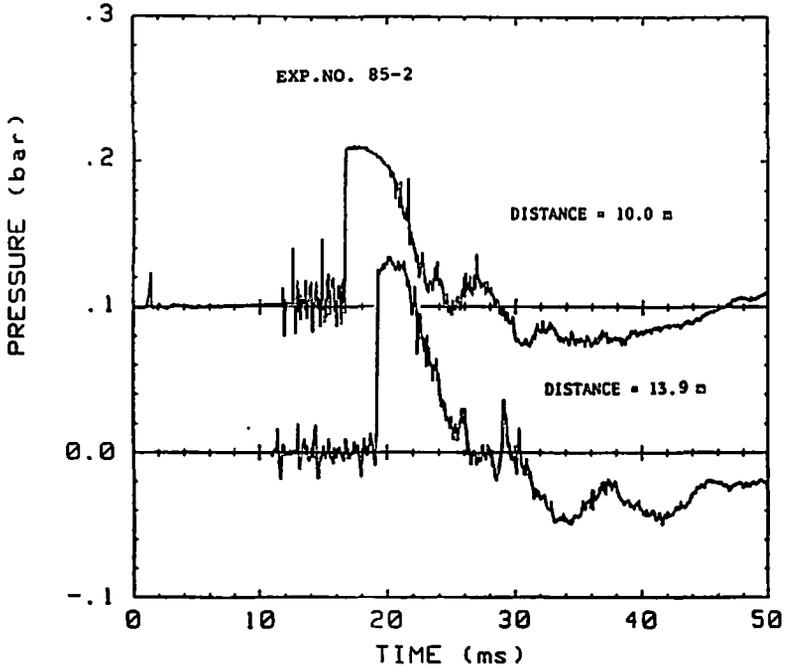


Fig. 3 Pressure-time profiles by the explosion of composite propellant (weight of propellant=11.1kg, $L/D=1$, $D=200\text{mm}$)

破壊し、砕けた推進薬片が着火、燃焼しながら飛散していることがわかる。このことから、推進薬の反応形態は定常爆轟状態ではなく、いわゆる爆燃にちかいものであることが推察される。その他、 $L/D=1$, $D=200\text{mm}$ および $L/D=3$, $D=400\text{mm}$ の場合の撮影も行ったが、薬径あるいは薬長薬径比の影響については

判然としなかったが、火炎片が飛散する状況は観測できた。一方、ダミー推進薬の場合には、もちろん上述のような火炎片が飛散する状況は発生しなかった。

3.2 爆風圧の測定結果

推進薬の爆発により得られた爆風圧波形の出力結果の一例を Fig. 2 に示す。これは実験番号 85-3 (プー

スタ爆薬のみ)および実験番号85-4(ブースタと推進薬)の場合である。測定点は、19.2m, 37.3mおよび51.8mの3ヶ所である。各測定点において、推進薬のピーク圧はダミー推進薬のそれよりも大きいので、推進薬はたしかに分解、発熱反応していることがわかる。また、遠方になるにつれピーク圧は小さくなり、衝撃波立ち上がり直後の圧力の減衰はしだいに緩やかになっている。一方、実験番号85-2(ブースタと推進薬)の測定距離10mおよび13.9mでの結果をFig. 3に示す。この場合、圧力の立ち上がり直後の波形が通常の衝撃波の圧力プロファイルと異なっている。また、測定距離13.9mでのピーク圧は近距離の10mでの結果より小さくならず、むしろ若干大きい。図には示していないが、これらより遠方で測定された爆風圧(19.2~100m)は、通常の波形を示した。この特異な圧力プロファイルは、爆源に近い2点でしか測定できなかった、Fig. 1の爆発状況から判断すると、ブースタ爆薬の爆発と推進薬の分解反応による爆燃の両方が重なあわさったので、Fig. 3のような圧力プロファイルになったと考えられる。このような推進薬の反応機構については今後さらに検討の必要があるように思われる。

次に、これらの爆風圧波形のデータを処理するために、比較的自由度の高い3次の自然スプライン関数を用いて圧力波形のフィッティングを行った。節点数は10ヶ所であり、衝撃波の立ち上がりを第1節点、第2衝撃波の立ち上がり直前あるいは圧力最小の点を第10節点とし、第1-第10節点の間をフィットした。フィッティング式の一般形を次式に示す。

$$\log_{10}(\Delta P) = C(1) \cdot x + C(2) + \sum_{i=1}^{10} C(i)(x - Xk(i))^3_+$$

$$x = \log_{10}(Rs)$$

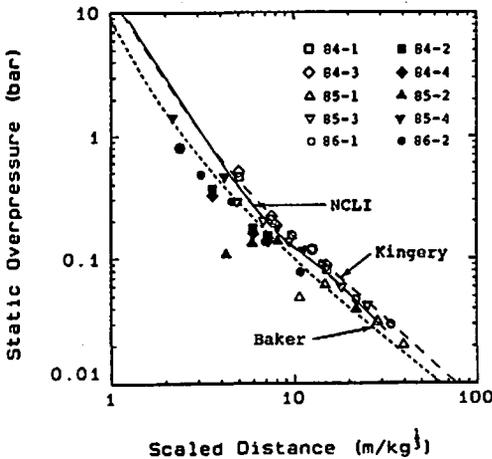


Fig. 4 Peak static overpressure

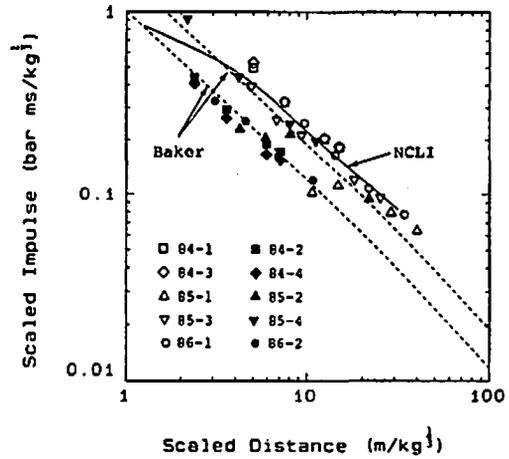


Fig. 5 Positive impulse

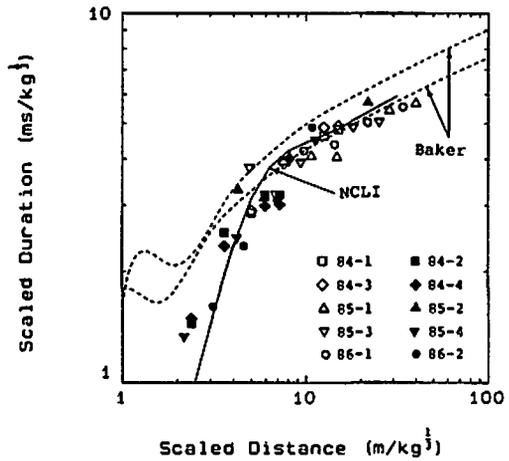


Fig. 6 Positive duration

ここに、 ΔP は静水過圧、 Rs は換算距離、 $C(i)$ はスプライン係数、 $Xk(i)$ は節点である。この3次のスプライン関数によるフィット式から衝撃波の到達時間、ピーク静水過圧、正相圧の時間積分(インパルス)、正相圧の持続時間、衝撃波立ち上がり直後の圧力減衰速度($-dp/dt$)を求めた。この方法による推進薬の爆風圧の結果をFig. 4~Fig. 8に示す。白抜きシンボルはブースタのみ、黒いシンボルはブースタと推進薬を合計した薬量のデータを示す。比較のためKingery(TNT, 地表爆発)⁷⁾、Baker(TNTの空中爆発)⁸⁾および1984年度~86年度の3ヶ年にわたり行ったTNTの爆風圧の結果をまとめたもの(以下NCLIと呼ぶ)を示す。Bakerの参考曲線が2本ある場合、1本は空中爆発、他方は完全剛体の地表面爆発(2倍薬量の空中爆発)のデータを示す。通常のTNT爆薬の地表爆発では地面が剛体でないため、この2曲線間に狭

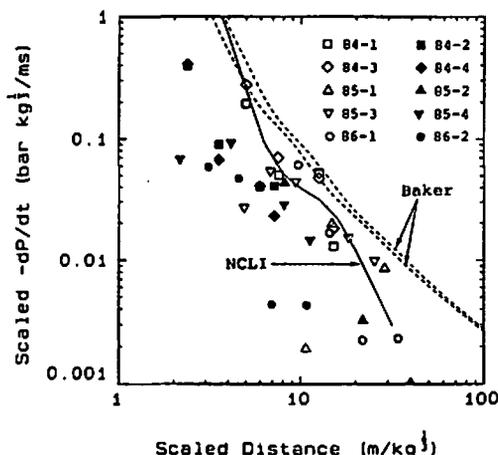


Fig. 7 Time of arrival

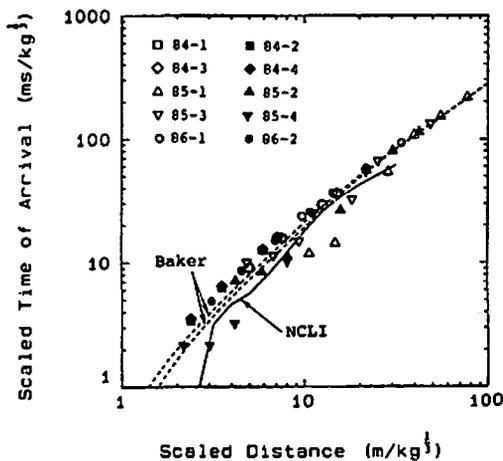


Fig. 8 Initial slope of pressure-time profile

まれることになる。

ブースタ爆薬の爆発エネルギーはTNTのそれよりも大きいため、Fig. 4~Fig. 5に示すようにそのピーク静水過圧およびインパルスもTNTのそれより大きい。一方、ブースタ爆薬と推進薬の組み合わせさせた試料の場合、そのピーク静水過圧およびインパルスはTNTのそれよりは小さかったが、ブースタ爆薬よりは大きい。したがって、超高圧により推進薬は爆発し、爆風圧に寄与することがわかる。また同一の薬径では薬長薬径比 L/D が小さい方が爆風圧は大きく、同一の薬長薬径比 (L/D) では薬径が大きくなると爆風圧も大きくなる傾向が認められる。また、その他の爆風圧特性値は、Fig. 6~Fig. 8に示すようにNCLIのま

わりにある程度の分布をもって広がっているが、BakerのTNTデータに近い結果を測定できた。なお、定量的な結果である推進薬のTNT換算薬量とその考察は次報で詳述する。

5. まとめ

平面爆轟波発生装置を用いてアルミ板を飛翔衝突させて15~20GPaの入射圧を加え、コンポジット推進薬を爆発させた。使用した薬量は34kg, 11.1kg, 86.4kg および260kgの4種類であり、換算高さは約0.2m/kg^{1/3}の高さである。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 高速度カメラの撮影結果から、超高圧の衝撃を受けた推進薬は爆轟せず、衝撃圧により細かな破片となり、これが着火、燃焼しながら放射状に飛散する。

(2) 推進薬の分解、発熱反応による爆風圧を換算距離2.3~44.9m/kg^{1/3}の範囲でビエソ圧力素子により測定した。測定結果はスプライン関数によりフィットし、ピーク静水過圧、インパルスおよび持続時間等の爆風圧特性値を得た。

(3) 推進薬の爆風圧(ピーク静水過圧およびインパルス)は、TNTほどではないがブースタ爆薬より大きく、衝撃超高圧を受けた推進薬は爆燃し爆風圧に寄与する。

謝 辞

実験の実施にあたり、関係諸官庁、産業火薬業界をはじめとして多数の方の協力を得た。深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) Chemical Propulsion Information Agency : "Hazards of Chemical Rockets and Propellants vol. 1 Safety, Health, and The Environment" September (1984).
- 2) R. B. Elwell et al., "Project Sophy-Solid Propellant Hazard Program"
- 3) 通商産業省立地公霄局保安課・工業技術院化学技術研究所, "火薬類保安技術実験報告書"(1984~86)
- 4) 加藤一成他, 工業火薬(投稿中)
- 5) 吉田正典他, 工業火薬, 46, 245(1985)
- 6) 田中克己他, 工業火薬, 47, 271(1986)
- 7) C. N. Kingery and B. F. Pannill, BRL Memorandum Report No. 1518 (1964)
- 8) W. E. Baker, "Explosions in Air", University of Texas, Austin(1973)

Explosions of composite propellants by ultra-high pressure initiation

(1) Blast Wave Measurements

by Yoshio NAKAYAMA*, Masatake YOSHIDA*, Yohzo KAKUDATE*
Mitsuaki IIDA*, Noboru ISHIKAWA*, Kazushige KATO**
Hiroshi SAKAI**, Shyu USUBA*, Katsutoshi AOKI*,
Nitaro KUWABARA*, Katumi TANAKA*, Kazumi TANAKA*
and Shyuzo FUJIWARA*

Flying a aluminium plate by the plane wave generator, composite propellants were exploded at the Field Explosion Experiment during 1984 to 1986. The weight of propellants used were 34, 11. 1, 86. 4 and 260kg. The two charge diameter size and two length-to-diameter ratio (L/D) were used. The results of high speed photographs of the event showed that propellants were fragmented into many fragments owing to the shock wave of initiation, and the fragments of burning propellant were emerging from a fireball. Airblast measurements were made by piezo gauges at distances ranging from 2. 3 to 44. 9 m/kg^{1/3}. The air blast recorded included peak pressure, positive impulse, positive duration, as well as shock wave time of arrival. The blast waves of propellant were smaller than those of TNT, but greater than those of the booster charges. This result showed that the propellants surely made the blast waves.

(*National Chemical Laboratory for Industry, Higashi, Tsukuba-Shi, Ibaraki-Pref., 305

**Nipon Oil and Fats Co., Taketoyo-machi, Chita-gun, Aichi-Pref., 470-23)
