

コンソリデート発射薬の着火、燃焼特性

馬崎 運*、飛田 栄治*、工藤 忠治*

粒状の発射薬を圧縮成型したコンソリデート発射薬の着火、燃焼特性を密閉ポンプ試験により評価した。着火圧力が低い場合、コンソリデート発射薬の単位体積あたりの質量(仮比重)が高くなるにしたがい、燃焼圧力立ち上がりからある一定の圧力に到達するまでの時間(着火遅れ時間)が長くなる傾向を示す。着火遅れ時間は、コンソリデート発射薬を着火するために使用する着火薬の着火圧力が高くなるにしたがい小さくなる傾向を示す。着火圧力が約5MPa以上では、コンソリデート発射薬の仮比重に影響されずにほぼ一定の着火遅れ時間を示す。コンソリデート発射薬の仮比重が高くなるにしたがい、圧力上昇速度が小さくなり、また燃焼表面積が低下する。このことから粒状薬同士が接着した形状を維持したまま燃焼していることが考えられる。

1. はじめに

限られた空間内の発射薬のエネルギーを高くし、設計されたエネルギー放出パターンを得るためには、発射薬成分のエネルギーを高くし所定形状に加工するか、所定形状の発射薬を可能な限りたくさん装填する方法が考えられる。発射薬のエネルギーを高くする方法に関しては、その成分の高エネルギー化の検討が進められており、例えば、酸化剤に爆薬成分であるニトラミン化合物や高エネルギー可塑剤等の物質を使用する試みが検討されている¹⁾²⁾。一方、所定形状の発射薬量を可能な限り装填する方法としては、例えば粒状の発射薬をランダムに装填した場合は、その単位体積あたりの質量(以下仮比重とする)は最大で 1.0×10^3 (kg/m³)程度が限界であるが、更に装填密度をあげる方法として粒状の発射薬を一列に配置していく方法が考えられた。その方法で、より装填をやりやすくした方法として、Partially Cutting Stick Propellant (PCSP)と呼ばれる方法が検討されている³⁾⁴⁾。この方法を使用することで、 1.2×10^3 (kg/m³)程度の仮比重を達成できる。更に、その他の方法としては、粒状の発射薬を溶剤や場合によっては、架橋剤等を用いて粒状の発射薬同士を接着するとともに圧力をかけて圧縮すること

で仮比重を高くする方法として考えられたコンソリデート発射薬がある。コンソリデート発射薬の成型方法に関しては種々の方法が考えられており⁵⁾⁶⁾、いずれの方法でもその仮比重は最大で $1.2 \sim 1.4 \times 10^3$ (kg/m³)程度まで高くすることができる。しかしながら、コンソリデート発射薬は、一定の力で固めていくため、より高い仮比重を得る場合は、初期の形状とは異なる形状になり所定のエネルギー放出パターンを得るためには、それらがどのように燃焼するかを把握する必要がある。更に、コンソリデート発射薬は初期表面積がコンソリデート化する前よりも小さくなっていると考えられ、その着火特性に関してもコンソリデート化していないものと比較すると異なっていることが予想される。このコンソリデート発射薬は、限られた空間内に可能な限り発射薬を装填できる方法としては非常に有効な方法であるにも関わらず、その着火、燃焼特性に関しては、これまで系統的な研究はほとんどなく、その特性に関しては不明な点が多い。そこで本研究では、粒状の発射薬を成型したコンソリデート発射薬の着火、燃焼特性を密閉ポンプ装置を用いることで検討を行った。

2 実験

2.1 試料

実験に使用した発射薬はニトロセルロースを主成分とするシングルベース系発射薬とした。使用した発射薬の組成はニトロセルロース約87wt.%, ジニトロトルエン10wt.%, ジブチルフタレート3wt.%, ジフェニ

1999年1月29日受理
 *旭化成工業(株)化薬研究所
 〒870-0392 大分県大分市大字里2620
 TEL. 097-592-2340
 FAX. 097-592-9603

ルアミン1wt%(外割)とした。コンソリデート化する前の発射薬の形状は、外径約 $\phi 0.87\text{mm}$ 、内孔径約 0.12mm 、長さ約 0.89mm の単孔管状薬を使用した。粒状発射薬をコンソリデート化する方法としては、溶剤を用いる方法を採用した。粒状の発射薬を容器に入れ、それに溶剤(アセトン/アルコール)を発射薬の重量に対して、5~10倍量添加した。容器上部から、一定の圧力で、所定の仮比重になるまで所定時間圧搾成型した。仮比重の制御は、溶剤中のアセトンとアルコールの比率を変える事で制御し、高仮比重のコンソリデート発射薬程発射薬の表面を溶解させた。圧搾成型後のコンソリデート発射薬の形状としては、外径 $\phi 20\text{mm}$ 、長さ $10\sim 40\text{mm}$ 程度の円柱状とし、仮比重を約 0.95 から約 1.30g/cm^3 の範囲のものを成型した。

2.2 実験方法

発射薬の燃焼特性を評価する方法として、燃焼室の容積が約 $249 \times 10^{-3}\text{m}^3$ の密閉ボンブ装置を使用した。試料の着火は、黒色火薬を使用した。圧力は、密閉ボンブ装置に取り付けられたピエゾ圧力センサーを使用し、デジタルオシロメーターにより圧力~時間データを収集しコンピューターにより解析した。着火圧力の調整は、所定の着火圧力になるように、密閉ボンブ装置内の空間容積に対する着火薬量と圧力のデータを取得しておこなった。コンソリデート発射薬は、コンソ

リデート成型後の形状のまま 293K にて5時間以上調温したものを密閉ボンブ装置に装填し着火、燃焼させた。装填密度は、約 0.03 から 0.06 程度とした。

3. 結果及び考察

3.1 着火特性

コンソリデート発射薬の着火特性に対する仮比重の影響を把握するために、一定着火圧力下における種々の仮比重のコンソリデート発射薬の密閉ボンブ試験を実施した。Fig.1に着火圧力が約 0.8MPa における密閉ボンブ試験結果を示す。圧力波形の圧力の立ち上がりから、着火薬の燃焼による圧力波形が発射薬の燃焼の圧力に変わる時間までをFig.2に示すように定義し、着火遅れ時間とした。Fig.1中の数字は、コンソリデート発射薬の仮比重を示すが、仮比重 0.882 はコンソリデート化前の発射薬、粒状の発射薬、を示す。着火圧力が約 0.8MPa では、コンソリデート発射薬の仮比重が高くなるにしたがい、着火遅れ時間が長くなる事が確認された。これは、コンソリデート発射薬は仮比重が高くなると初期燃焼表面積が小さくなっていくため、着火圧力が低い場合は、発射薬が定常燃焼に移行する圧力に達するまでに時間を要すると考えられる。そこで、着火圧力を変えることにより、その着火特性を検討した。Fig.3及び4に着火圧力が約 3MPa 及び 6MPa に於ける密閉ボンブ試験結果を示す。着火遅れ時間は、着火

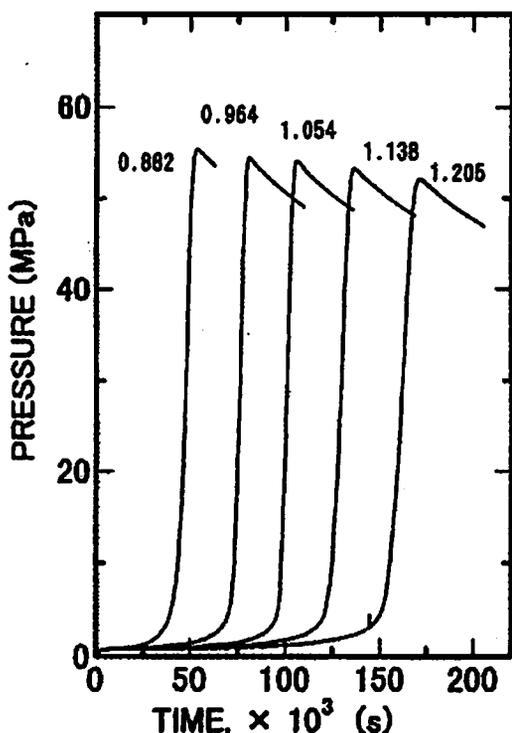


Fig. 1 Pressure ~ time profiles for consolidated propellants at 0.8MPa of ignition pressure. (Numerals indicate loading specific density.)

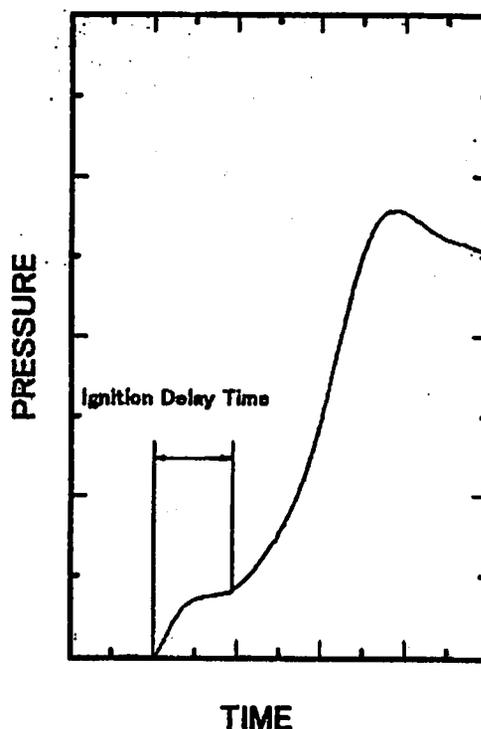


Fig. 2 Definition of ignition delay time for closed bomb test results.

圧力が約3MPaの時も仮比重が高くなるにしたがい、着火遅れ時間が長くなる傾向を示した。しかしながら、その時間は着火圧力が0.8MPaの時より短くなっている。着火圧力とコンソリデート発射薬の仮比重が着火遅れ時間へどのように影響を及ぼすのかを確認するために、密閉ボンブ試験結果をFig.5に示すように縦軸に着火遅れ時間、横軸にコンソリデート化前の発射薬の仮比重(ρ_p)に対するコンソリデート化後の発射薬の仮比重(ρ_c)の比を取り、各着火圧力に於ける着火遅れ時間と ρ_c/ρ_p の関係を示した。Fig.5より、着火圧力が5MPa以上ではコンソリデート発射薬の仮比重に関係なく、ほぼ一定の着火遅れ時間を示すことが確認できた。コンソリデート化前の発射薬に於いても、着火圧力が3MPa以上ではほぼ一定の着火遅れ時間を示している。これらの結果から、前述のように、着火圧力が低い場合は、発射薬を同時に着火させるエネルギーが低く、またコンソリデート発射薬の仮比重が高くなると初期表面積が小さくなることから、コンソリデート発射薬の仮比重が高くなるにしたがい、着火遅れ時間が長くなることが考えられる。本研究に使用したコンソリデート発射薬を仮比重に関係なく、最小限の着火遅れ時間で定常燃焼させるためには、5MPa以上の着火圧力が必要である。但し、これらの結果に関しては、黒色火薬及び本研究の方法で成型したコンソリデート発

射薬を使用した場合の結果であり、黒色火薬以外の着火薬及び他の成型方法のコンソリデート発射薬を使用した場合は、異なる圧力及び着火遅れ時間で定常燃焼に移行するものと考えられる。

3.2 燃焼特性

Fig.3及び4に示すように、コンソリデート発射薬の仮比重が高くなるにしたがい、圧力の立ち上がりから最大圧力に到達するまでの時間(圧力上昇速度)が長くなっている。本研究に使用したコンソリデート発射薬は、溶剤で発射薬表面を膨潤、溶解させて粒状発射薬同士を圧着させることで成型している。そのため、コンソリデート発射薬の仮比重が高くなるにしたがい、粒状発射薬間の膨潤、溶解の割合が大きくなっていくため圧着度が強くなり、粒状に戻りにくくなる。そのため、仮比重が高くなるにしたがい、粒状になるために時間を要しているか或いは完全に粒状にならずに燃焼するため燃焼表面積が小さくなり、最大圧力までの時間が長くなっていると考えられる。そこで、燃焼時の形態を推定するために、燃焼時の燃焼表面積を求め、コンソリデート化の影響を検討した。単位時間あたりの燃焼生成物の発生速度(dm/dt)は(1)式で示される関係を使用した⁹⁾。

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot r \cdot S \quad (1)$$

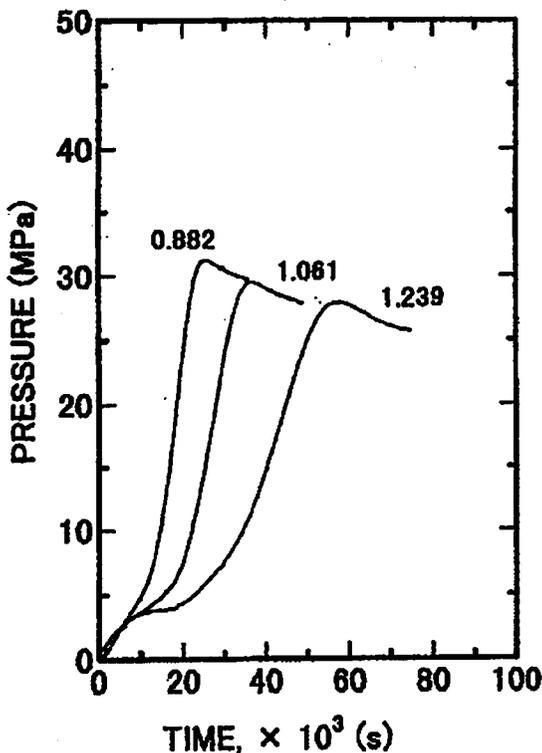


Fig. 3 Pressure ~ time profiles for consolidated propellants at 3MPa of ignition pressure. (Numerals indicate loading specific density.)

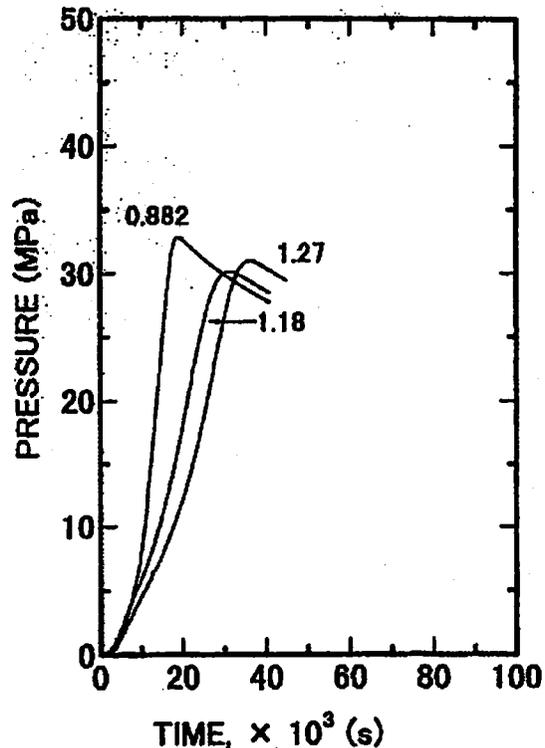


Fig. 4 Pressure ~ time profiles for consolidated propellants at 5MPa of ignition pressure. (Numerals indicate loading specific density.)

ここで、 m は燃焼生成物の質量、 ρ は発射薬の密度、 r は発射薬の燃焼速度、 S は燃焼表面積を示す。単位時間あたりの燃焼生成物の発生速度は、密閉ボンブ試験に於ける圧力～時間曲線から得られる圧力上昇速度(dP/dt)と相関があると考えられる⁷⁾。そこで、各仮比重のコンソリデート発射薬の密閉ボンブデータを用いて、燃焼表面積を求めた。また、燃焼速度は、コンソリデート化後もコンソリデート化前と変化しないと仮定し、コンソリデート化前の発射薬の燃焼速度データを密閉ボンブ装置より求めて使用した。得られた結果を、コンソリデート化前の燃焼表面積で割ることにより、燃焼表面積比(S/S_0)とした。

Fig.6～9に燃焼表面積の変化と燃焼率をプロットした結果を示す。また、理論計算による燃焼表面積の変化も同時に示す。燃焼率は、密閉ボンブ試験結果の圧力～時間曲線における各時間の圧力を最大圧力で割った値とした。Fig.6～9より、データのばらつきが大きいが、コンソリデート発射薬の仮比重が大きくなるにしたがい、燃焼表面積比は理論値からずれていく。この結果から、仮比重が高くなるとコンソリデート化前の粒状状態で燃焼をせずに粒状発射薬同士が接着された形態で燃焼していることが考えられる。また、コン

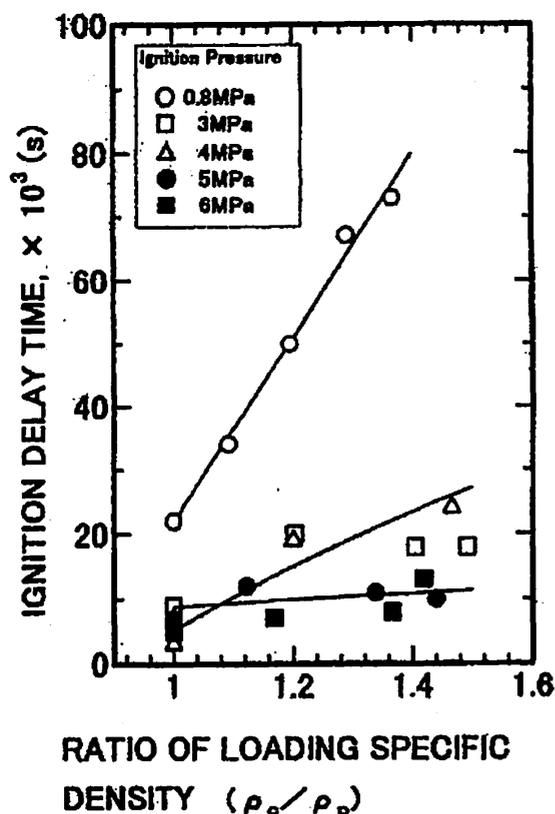


Fig. 5 The relationship between ignition delay time and loading specific density of consolidated propellants as a function of ignition pressure.

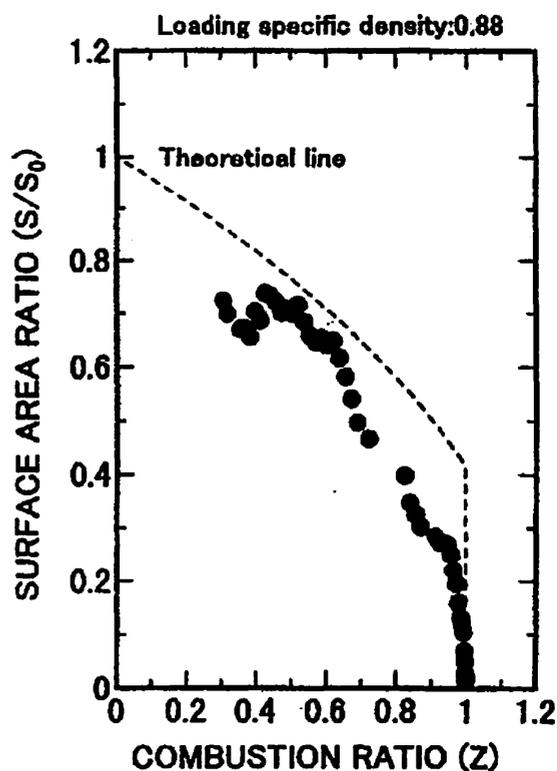


Fig. 6 Surface area ratio vs. combustion ratio for granular propellant of loading specific density 0.88.

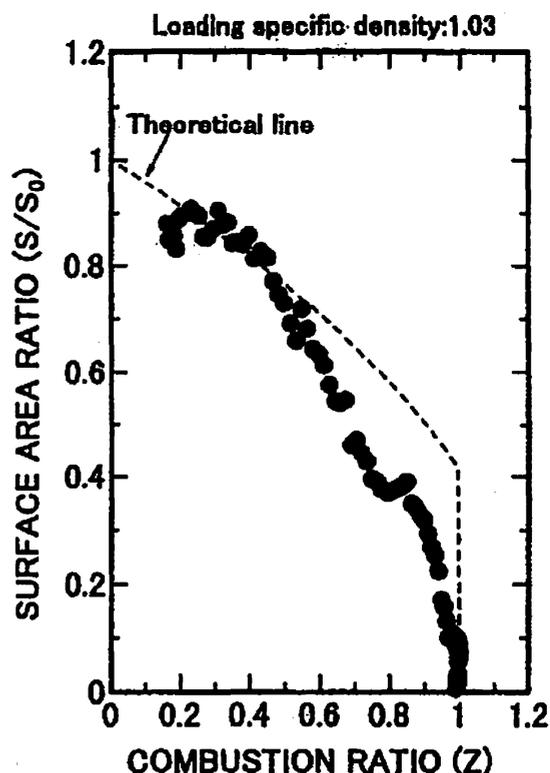


Fig. 7 Surface area ratio vs. combustion ratio for consolidated propellant of loading specific density 1.03.

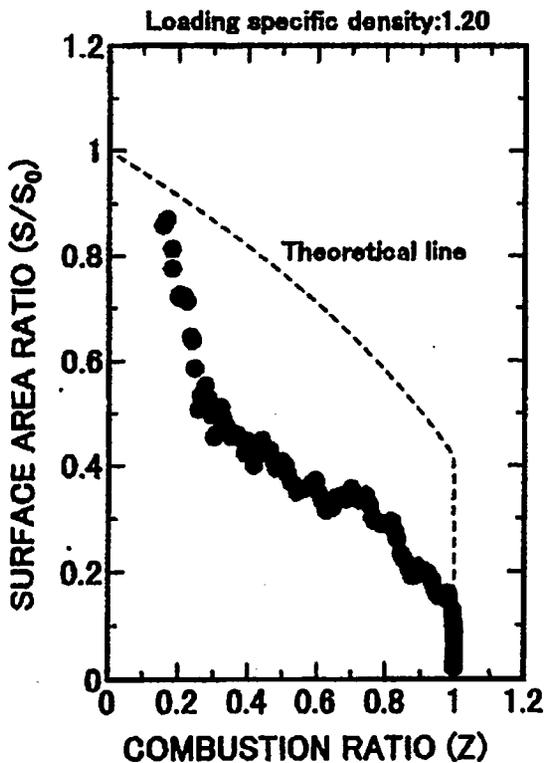


Fig. 8 Surface area ratio vs. combustion ratio for consolidated propellant of loading specific density 1.20.

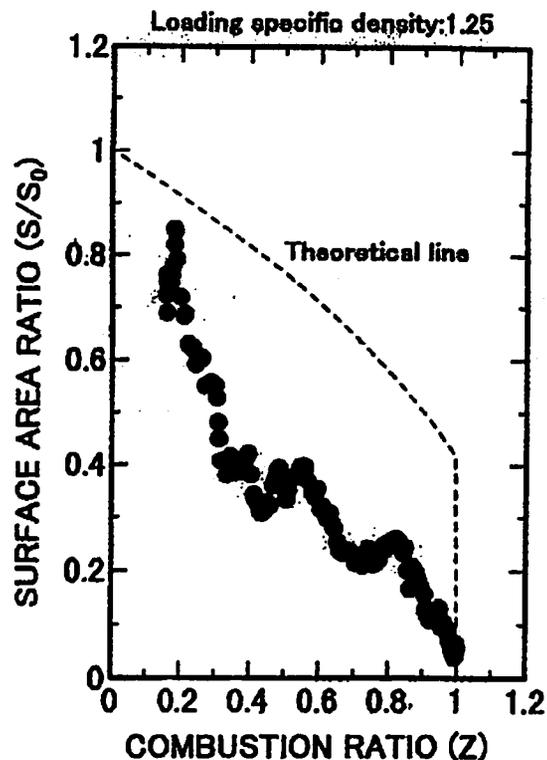


Fig. 9 Surface area ratio vs. combustion ratio for consolidated propellant of loading specific density 1.25.

ソリデート化前の表面積の変化状況とほぼ同等の状況を示す仮比重としては、約1.1程度である。そのため、より高仮比重で再現性の良い燃焼性能を得るには、発射薬粒の接着状態を制御する必要があると考えられる。

4. 結 論

- 1) コンソリデート化により発射薬を圧搾成型すると、着火遅れ時間に影響を及ぼし、仮比重が大きいほど着火遅れ時間が長くなる。
- 2) 着火圧力を高くすることにより、コンソリデート発射薬の仮比重に関係なく、一定の着火遅れ時間を達成できる。
- 3) コンソリデート発射薬の仮比重を高くすると、密閉ポンプ装置内に於ける圧力上昇速度が小さくなる。これは、仮比重が高くなるにしたがい発射薬粒間の接着力が強くなり、コンソリデート化前の形状で燃焼しないためと考えられる。

文 献

- 1) Jeffery C. BOTTARO, "Recent advances in explosives and solid propellants", Chemistry & Indus-

try, 1 April, 249 (1996).

- 2) Ronald L. Simmons, "High Energy Gun Propellants", 32nd ADPA Gun & Ammunition Meeting, 7-10 April (1997).
- 3) ジャン ボアッソ, ジャンルイ ボラン, 特開平 5-215500.
- 4) レンナンルト ヨハンソン, マッツ オルソン, トル スラン ベルソン, 特開昭64-69588.
- 5) J. O. DOALI, A. A. JUHASZ et al, "Combustion Characteristics of Consolidated Propellants Resulting from Different Consolidation Techniques", BRL-TR-2944 (1988).
- 6) Ingo W. MAY, Arpad A. JUHASZ, "Combustion Process in Consolidated Propellants", ARBRL-MR-03108 (1981).
- 7) Frank E. FORTINO, "Effect of Consolidation Parameters on the Burning of Consolidated Propellant Charges - Phase I", 1979 JANNAF Propulsion Meeting, March, 155 (1979).

Ignition and combustion characteristics of consolidated propellant

Hakobu BAZAKI*, Eiji HIDA*, Chuji KUDOH*

Ignition and combustion characteristics of consolidated gun propellants which is obtained by compacting granular propellants were studied by using closed bomb. When ignition pressure is relatively low, increasing loading specific density of the consolidated propellant results in increasing ignition delay time. Ignition delay time is decreasing with increasing ignition pressure of consolidated propellant. Ignition delay time indicates almost the same delay time independent on the loading specific density of consolidated propellants when the ignition pressure is higher than the pressure of 5 MPa. The pressure generation rate (dP/dt) of consolidated propellants and combustion surface area are decreasing with increasing the loading specific density of consolidated propellants. The results indicate that the consolidated propellants are burning with maintain the consolidated form.

(*Explosives R & D center, Explosives Division, Asahi Chemical Industry Co., Ltd.
2620 Oaza-sato, Oita 870-0392, Japan)
