

## 定量銃撃感度試験による発射薬の銃撃に対する応答機構に関する研究

有澤治幸\*, 木村潤一\*

グレインサイズ及び表面処理状態の異なる2種類の発射薬(ダブルベース系及びトリプルベース系発射薬)を用いて発射薬反応時の圧力上昇を計測できる定量的感度試験法により12.7mm弾の貫通に対する応答(銃撃感度)を評価した。

定量銃撃感度試験結果より、発射薬の銃撃感度は、発射薬のグレインサイズを大きくした場合及びグレイン表面に黒鉛光沢処理をした場合その感度が低下することから、グレインサイズ及びグレインの表面処理に大きく依存することが分かった。また、容器(感度試験用容器)の内側にネオプレンゴム(NBR)のライナーを施した容器を用いて銃撃感度試験を実施したところ、容器後面(弾丸が抜け出る側)にNBRを施したものは、NBRライナーをしないものに比べ最大圧力が約60%低下し、弾丸が容器より抜け出る際容器より発生する熱破片が発射薬の銃撃における応答機構に大きく影響することが分かった。

## 1. 緒言

火薬類の弾丸の貫通による応答(銃撃感度)の評価法は、銃撃という軍事的な事故の模擬だけでなく、爆発事故の際、発生する破片の貫通による火薬類の応答(破片衝撃感度)に属する現象であるため、世界各国においてその試験法が規定されている<sup>1-3)</sup>。しかしながら、いまだその反応状況の判定は、火薬を収納していた容器の破碎状況からの定性的な判定(無反応-燃焼-爆燃-爆発-部分爆轟-爆轟)<sup>1)</sup>及び定性的判定を数値化したもの<sup>4)</sup>等により行われている。火薬類の銃撃感度に対する物理的見地からの解釈は、弾丸の貫通時に起る物理・化学現象が複雑なため非常に困難である。文献では、弾丸等の高速物体を火薬類に衝突させその挙動を解析する実験<sup>5-6)</sup>、有限要素法等を用いた爆薬内の圧力波の伝播・反射・干渉のシミュレーション<sup>7-9)</sup>、衝突により生ずる一次衝撃波の伝播・反射により生成される二次衝撃波に起因するXDT(遅延爆轟)の実験及びシミュレーション<sup>10)</sup>、空隙を持つ爆薬に弾丸が貫通する際生じる火薬の“Bubble”と空隙との関係<sup>11)</sup>、通過する弾丸近傍での爆薬の破碎状況に対する模擬実験<sup>12)</sup>等が報告されている。

火薬類のうち、発射薬の銃撃感度は、容器内に均一

に材料が充填される爆薬と異なり、あらかじめ適正燃焼特性を持つように成形されたグレインを容器内に収納するため、グレイン内に空隙が生じ弾丸は不均一な媒体を通過することになる。この場合、上記均一な媒体に対する数値計算結果は、発射薬-空隙間の圧力波の干渉を考慮に入れていないため、その反応状況を予測することは困難である。

我々は、平成2年度より火薬類の各種感度を定量的に評価するため、従来の定性的かつ人間の主観的判断による感度試験法を改良し、火薬が反応する際生じる分解ガスの圧力上昇により定量的な評価をおこなった<sup>13-15)</sup>。その結果、発射薬の銃撃感度は落植感度及びカードギャップ感度試験に見られるような外部からの強い衝撃による応答<sup>13,15)</sup>及び弾丸が容器壁面を貫通する際生じる熱破片による熱的応答<sup>15)</sup>が大きく影響することが分かった。

今回の研究は、現在まで得られた発射薬の銃撃感度に対する我々の研究成果及び文献による応答機構に対する知見を踏まえ、発射薬の銃撃に対する応答に寄与する因子を把握することを目的とした。

## 2. 実験

## 2.1 定量銃撃感度試験法

今回用いた定量銃撃感度試験法をFig. 1に示す。Fig. 1に示す定量銃撃感度試験法は、銃撃感度に関する米軍規格<sup>1)</sup>を平成2年度に発射薬を収納する容器を定量的評価<sup>13)</sup>が行えるよう改良して行ったものである。使

1999年3月2日受理

\*防衛庁技術研究本部第1研究所第1部弾薬第4研究室  
〒153-8630 東京都目黒区中目黒2-2-1  
TEL 03-5721-7005 内線6229&6419  
FAX 03-3713-6077

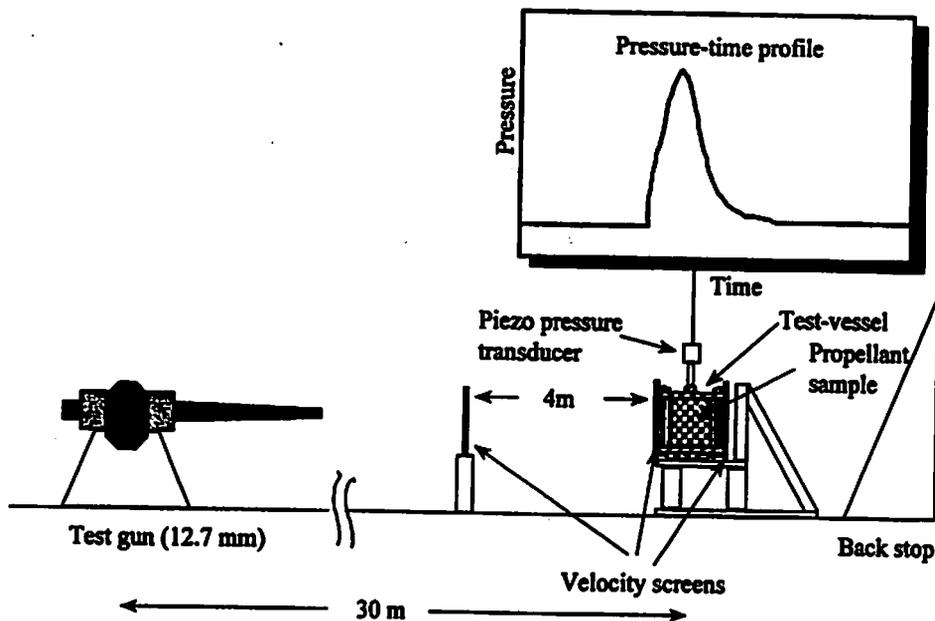


Fig. 1 Schematic set-up of small-scale and quantitative bullet impact test

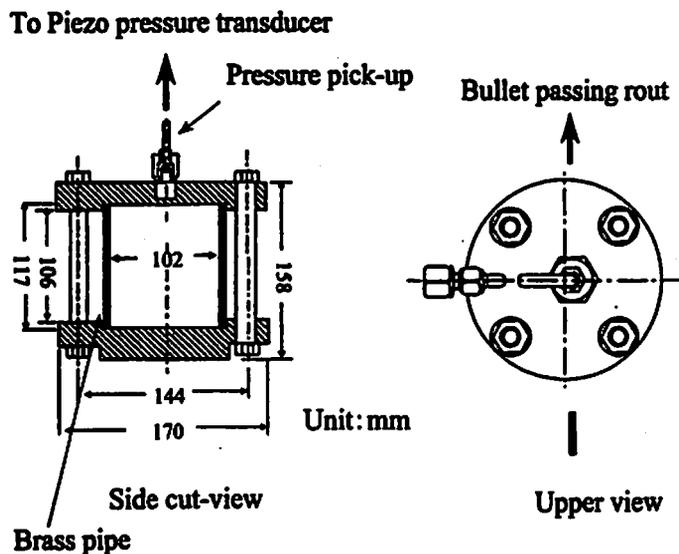


Fig. 2 Cut-view of pressure pick-up test vessel

用した容器 (Fig. 2) は、上下部に厚さ10mmの鉄製フランジをもち、弾丸が通過する筒部分に黄銅製チューブ(外径105mm, 厚さ2mm)を使用した構造である。容器内部には、発射薬を約1kg収納することができる。また、上部フランジの中央部分には圧力測定孔があり、弾丸貫通時の衝撃が圧力センサーに直接伝達されないよう工夫したフレキシブルチューブを介して圧力が測定できる構造である。試験では、12.7mm試験銃を容器から30mm離れた場所に設置し、12.7mm試験弾により単発射撃を行い、発射薬の応答をフレキシブルチューブを介して取り付けられたピエゾ圧力センサによ

る圧力により定量的に評価した。ピエゾ圧力センサーによる圧力測定と同時に容器前後面及び容器より4m前方に箔的を設置し、弾丸が容器に衝突する際及び容器内通過時の弾丸の速度を測定した。弾丸の容器衝突直前の速度は $831.4 \pm 5.6\text{m/s}$ であり、文献より、この速度範囲では火薬類の銃撃感度は弾丸の速度に依存しないことが報告されている<sup>4)</sup>。圧力及び速度のデータは0.5 $\mu\text{s}$ おきにレコーダに取り込み解析に使用した。得られた圧力-時間データの典型例を Fig. 3に示す。

## 2.2 発射薬組成

本研究では、ニトロセルローズ (NC)、ニトログリセ

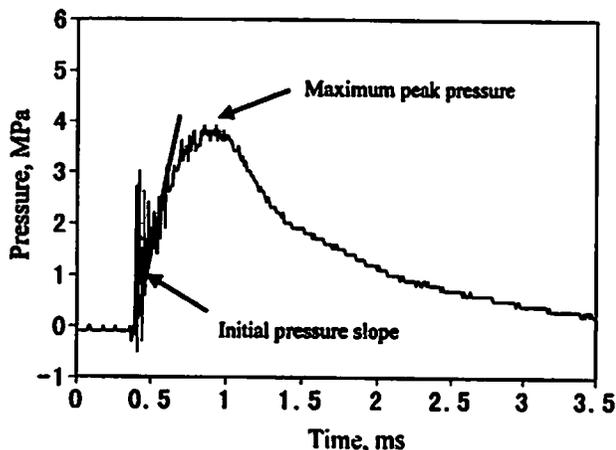


Fig. 3 A typical pressure-time profile by the small-scale bullet impact test. The sample has double base propellant composition and no graphite surface coating

リン (NG), ジエチレングリコール ジナイトレート (DEGDN) を発射薬主剤としてそれぞれ約 60%, 約 15%; 約 25% 含んだダブルベース系発射薬及び NC, NG 及びニトログアニジン (NGu) を発射薬主剤としてそれぞれ約 28%, 約 23%, 約 47% 含んだトリプルベース系発射薬の 2 種類の発射薬を用いた。

発射薬の形状として, 7 孔管状中型発射薬グレイン (外径: 約 3mm, 内径: 約 0.3mm, 薬長: 約 7mm) 及び 7 孔管状大型発射薬グレイン (外径: 約 9mm, 内径: 約 0.8mm, 薬長: 約 22mm) の 2 種類のグレインを用い, 銃撃感度におけるグレイン形状依存性評価を行った。また, 発射薬表面に黒鉛光沢処理を行ったグレイン及び発射薬表面の処理を行わなかったグレインを用いて発射薬表面処理の影響を調べた。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 発射薬グレインサイズと反応との関係

過去の試験結果から発射薬の銃撃に対する応答は, (1) 弾丸の衝突による衝撃的な因子に対する応答, (2) 弾丸貫通時容器より発生する破片による熱的な因子による応答の 2 種類が大きく影響することが分かっている<sup>13, 15)</sup>。しかしながら, 発射薬の銃撃感度がこれら 2 種類の因子のみであるとすれば, 発射薬の銃撃感度は, 発射薬のグレインサイズには依存しないはずである。過去の文献においても発射薬銃撃感度のグレイン依存性について論じた報告はない。今回の試験では, この依存性を確認するために同一組成, 同一形状 (7 孔管状形) 及び発射薬の表面処理なしでそのグレインの大きさのみ異なる発射薬を用いて銃撃に対する感度を比較した。Fig. 4 に異なるグレインサイズのダブルベース系発射薬の銃撃感度における圧力-時間データを示す。

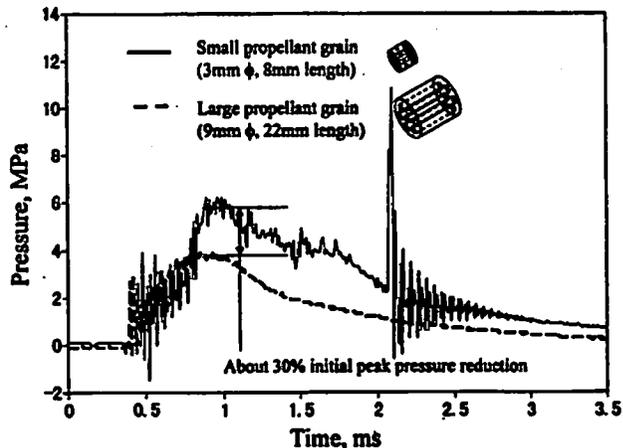


Fig. 4 Grain size dependence of bullet impact response. The samples have double base propellant composition and no surface coating

上記で述べた予測と反して, 中型グレインサイズの発射薬は, 大型グレインサイズに比べ, 最大圧力において 4 倍大きな値を示し, 発射薬の銃撃感度は, そのグレインサイズに大きく依存することが分かった。この結果は, 上記 2 種類の因子以外に銃撃感度に大きく寄与する因子が存在することを示している。Fig. 4 の 2 種類の発射薬の唯一異なる点はそのグレインサイズである。よって, 異なるグレインサイズの発射薬を同一形状の容器につめた場合, 発射薬グレイン間の接触面積が異なると考えられるため発射薬グレインの接触面からの摩擦による因子が発射薬全体の銃撃感度に大きく寄与していると考えられる。摩擦による因子としては, (1) 弾丸-発射薬グレイン間の摩擦, (2) 発射薬グレイン間の摩擦の 2 種類が考えられる。このうち, 弾丸-発射薬グレイン間の摩擦は, 爆薬の銃撃感度をシミュレートした報告<sup>12)</sup>において考慮されているが, 弾丸が発射薬内を通過する場合, 発射薬グレインは弾丸により破碎され, この場合の摩擦的因子は, 破碎された発射薬粉-弾丸間の摩擦によるものであり, 異なる発射薬グレインサイズによって銃撃感度における最大圧力が大きく変化するとは考えにくい。よって, 発射薬グレイン間の接触面から起因する摩擦が大きく寄与すると考えられる。以上の結果の他に Fig. 4 より興味深い点は, 初期の圧力-時間データ (2.0ms 以下) においてその曲線の形がほぼ同一であり, 最大圧力のみ違いを見せている。これは, 同一組成では弾丸の貫通による着火現象が同じであり, 最大圧力の違いは, 発射薬グレイン間の接触面積の違いより起因するものであることを裏付けている。また, 中型発射薬グレインの圧力-時間データ後期 (2.0ms 以上) に見られる圧力の振動は, 大型グレインの圧力-時間データには見られ

ないが、中型同一グレインの他の組成のものにはしばしばみられる。この圧力の振動は、高圧力指数のダブルベース系ロケット推進薬での中程度の圧力領域(2.1~3.7MPa)の燃焼に見られる振動燃焼と同様な原因であると考えられる<sup>16)</sup>。

### 3.2 発射薬の表面処理と反応との関係

上記の考察を確認するため、次に同一組成、同一グレインサイズ(同一7孔管状形状)でグレイン表面を黒鉛で光沢させた発射薬及びグレイン表面処理なしのトリプルベース系組成の発射薬を用いて銃撃感度の比較を行った。Fig. 5に得られた表面処理の異なる発射薬の圧力-時間データを示す。Fig. 5より、発射薬の表面状態により、銃撃での応答が大きく変化することが分かった。Fig. 4とFig. 5の比較より興味深い点としては、グレインサイズのみ異なる発射薬の初期の圧力-時間データ(Fig. 4)はその最大圧力を除いてほぼ同じ形を示すのに対して、発射薬の表面処理を行ったもの(行っていないもの(Fig. 5)とではその圧力-時間データが異なり、表面処理を行ったものは初期の圧力上昇勾配が表面処理を行っていないものに比べ減少している。

上記結果以外に、発射薬の黒鉛表面処理の銃撃感度結果から弾丸が通過した際の発射薬の動きを推定する事ができる。黒鉛表面処理を行った発射薬の銃撃試験後、回収した容器の内面状況写真をFig. 6に示す。Fig. 6の容器内面の発射薬グレイン跡が示すように、通過前容器内に等方的に詰められていた発射薬グレインが、弾丸の通過によって弾丸通過孔を中心として放射線状に配向されている。一方、大型グレイン発射薬の銃撃感度試験を行った後回収した容器内面の発射薬グレインの痕跡を観察すると、大きなグレインサイズの発射

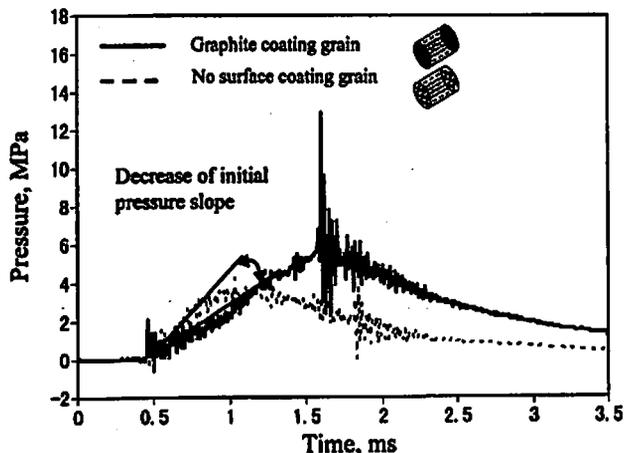


Fig. 5 Surface coating effect of bullet impact response. The sample has triple base propellant composition and small grain size



Fig. 6 Trace of shear motions of small-size gun propellant grains after bullet impact. White arrows indicate the trace of parabolically oriented gun propellant grain

薬に対しては、銃撃後も発射薬グレインがランダムな方向に向いており、弾丸通過時に発生するせん断力の影響がないことを示している。このことは、中型グレイン発射薬において、弾丸の通過によって弾丸回りに急激なせん断力が発生しているを示唆していると考えられる。

### 3.3 容器より発生する熱破片効果の定量的評価

我々の過去の研究成果より、火薬類の銃撃感度における反応は、弾丸が容器を貫通する際発生する容器の高温破片に依存することが分かった<sup>13,15)</sup>。しかしながら、容器の破片生成は弾丸の容器貫入時及び貫出時の両方の場合において発生する可能性があり、どちらの現象より発生した破片がより発射薬の反応に影響を及ぼすかは確かめられていない。今回はこの知見を得るためにトリプルベース系組成の発射薬(大型グレイン)を用い容器の前面及び後面に厚さ約1mmのネオブレン(NBR)ライナーを貼り、銃撃感度における反応の差を比較した。NBRの容器内への貼り付け位置(NBRなし、NBRを前面に貼った場合、及びNBRを後面に貼った場合)及び回収した容器の破壊状況をFig. 7に示す。Fig. 7より、NBRを容器前面に貼った場合とNBRを貼らない場合の発射薬の応答は同程度であった。しかしながら、NBRを容器後面に貼った場合は発射薬の反応が著しく低下した。NBRなしの場合と後面に貼り付けた場合の圧力データの比較をFig. 8に示す。これらの結果より、弾丸が容器に貫入する場合に発生する高温破片は、貫入時容器外に飛散するため発射薬の銃撃感度に対して影響を及ぼさないが、弾丸が容器後面より貫出する場合に発生する高温破片は、発射薬の反応に大きく影響し、Fig. 8より、NBRを容器後面に貼

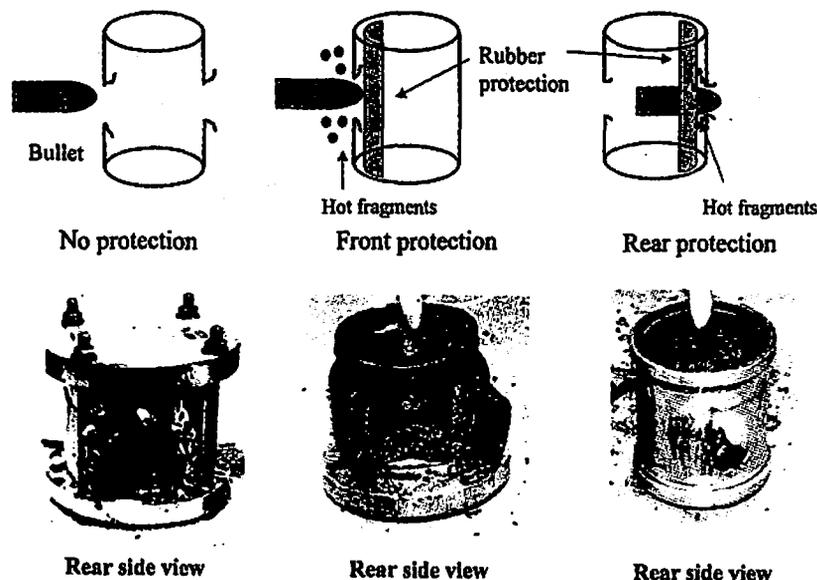


Fig. 7 Effect of hot fragment produced from the test vessel, (A) fragmentation of the test vessel in a case of non-rubber protection, (B) fragmentation of the test vessel in a case of front rubber protection, (C) fragmentation of the test vessel in a case of rear-rubber protection. The sample has triple base propellant composition and no surface coating

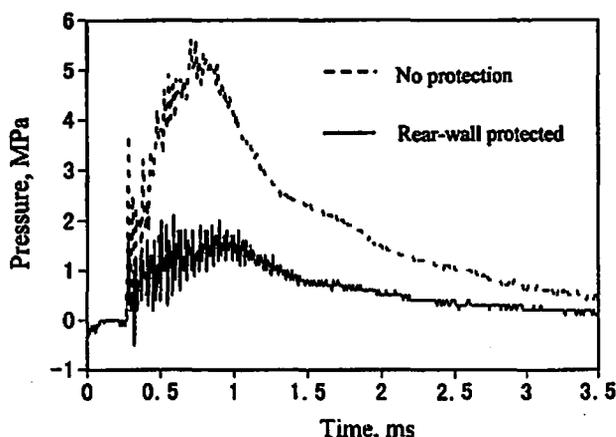


Fig. 8 A difference of response between non-protected and rear-rubber protected test vessel's results.

った場合最大圧力が約60%低下することがわかった。

### 3.4 発射薬の銃撃感度に及ぼす物理・化学現象の

#### 仮説モデル

3.1～3.3項の結果及び現在まで報告されている火薬類の銃撃感度に及ぼす因子を総合し、モデル化した発射薬の銃撃感度に及ぼす物理・化学現象をFig. 9に示す。発射薬の銃撃感度では、以下に示すような4因子が寄与していると考えられる。

(1) 弾丸の容器衝突時に発生する一次衝撃波によるSDT(殉爆)的な反応及び伝播・反射により生成す

る二次衝撃波等によるXDT(遅延爆轟)的な反応<sup>10, 12)</sup>。

(2) 弾丸が容器内を通過する時の弾丸-発射薬間の摩擦<sup>12)</sup>。

(3) 弾丸通過時に発生するせん断力による発射薬グレイン間の摩擦。

(4) 弾丸が容器後面の通過時に発生する高温容器破片からの発射薬グレインへの熱伝導<sup>13, 15)</sup>。

このうち第3の因子は、発射薬の形状及びグレインサイズに依存すると考えられる。

#### 4. 結 論

本研究では、銃撃により弾丸が発射薬容器内を貫通する際発射薬からの応答が：(1)発射薬のグレインサイズ(形状)、(2)発射薬の黒鉛光沢(表面処理)、(3)弾丸の容器を貫通し容器を抜け出る際に容器より発生する熱破片(熱破片効果)に依存することがわかった。また、熱破片効果を減少させるため、金属容器-発射薬間にゴム等のライナーを挟むことが効果的であることが分かった。

今回の研究結果(発射薬の形状依存性、発射薬の表面処理依存性及び発射薬容器からの熱破片効果)及び過去の論文報告を総合的に考慮し、かつ、銃撃後回収した容器内の観察より、ア)弾丸衝突時の衝撃波の干渉、イ)弾丸-発射薬間の摩擦、ウ)発射薬グレイン間の摩擦、エ)容器破片からの熱伝導の4因子により起因することを示唆することができた。

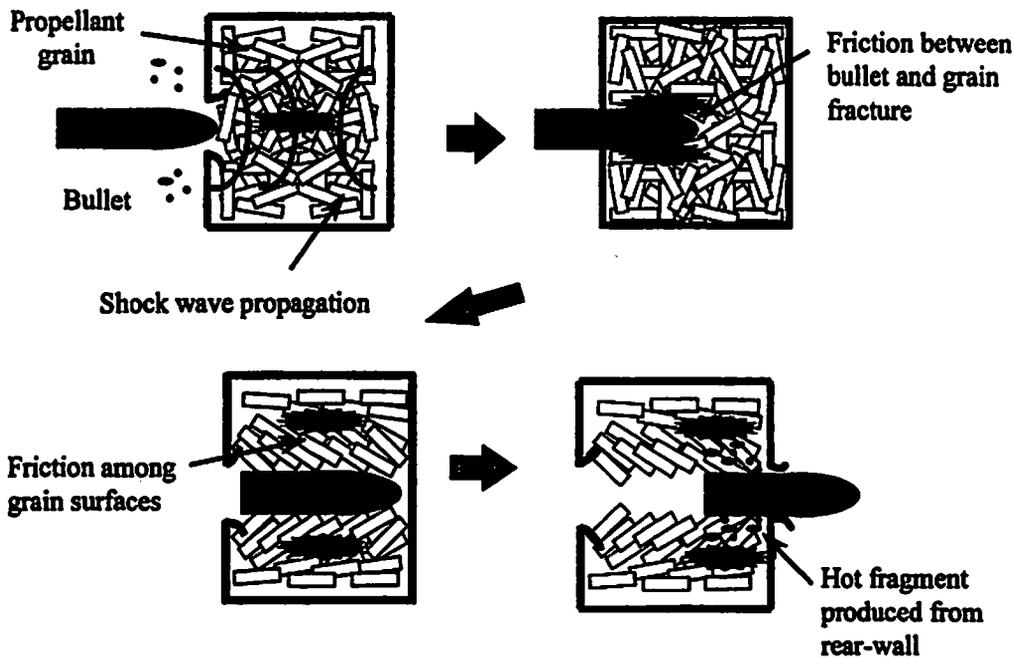


Fig. 9 A hypothetical model of the bullet impact response of gun propellant

本研究は、火薬類のうち発射薬のみに注目し銃撃感度試験を行ったが、得られた試験結果は火薬類一般に通じる知見であると考えられる。すなわち、銃撃感度試験もしくは一般的な破片衝撃感度に関する火薬類の応答を評価する試験においては、試験に用いる火薬類の形状、表面処理の有無、用いる容器の形状・材質等を厳密に規定する必要があると考えられる。

#### 文 献

- 1) MIL-STD-2105B, "Hazard Assessment Tests For Non-Nuclear Munitions", Military Standard, January, 1994.
- 2) (社)火薬学会, "火薬学会規格 銃撃感度試験", 火薬学会規格(IV)(感度試験法) ES-23, 1995
- 3) United Nations, "Recommended on the Transport of Dangerous Goods. Manual of Test and Criteria", 1995, United Nations Publications.
- 4) 小林松男, 防衛庁技術研究本部技報, 第5775号, 1990
- 5) J. Delistraty and H. Brandt, Propellants Explosives Pyrotechnics, 7, P.113(1982).
- 6) C.W. Fong, Propellants Explosives Pyrotechnics, 10, P.91(1985).
- 7) M. S. Chawla and R. B. Frey, Propellants Explosives, 3, P.119(1978).
- 8) S. Hamaide, M. Quidot, and J. Brunet, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 17, P.120 (1992).
- 9) P. C. Chou, L. Roslund, and D. Liang, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 18, P.264 (1993).
- 10) Y. Guengrant and J. F. Guery, 28th International Annual Conference of ICT, Karlsruhe, FRG, v26(1997).
- 11) S. A. Finnegan, J. K. Pringle, J. C. Schulz, O.E.R. Heimdahl, and A. J. Lindfors, The Symposium on Insensitive Munitions Technology Symposium, San Diego, CA, P.406(1992).
- 12) R. Kent and J. L. Pinchot, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 16, P.221(1991).
- 13) 木村潤一, 清水俊彦, 小浦常生, 防衛庁技術研究本部技報, 第6122号, 1991
- 14) 木村潤一, 丸山 淳, 林 英之, 防衛庁技術研究本部技報, 第6612号, 1996
- 15) J. Kimura, H. Arisawa, and T. Shimidzu, 28th International Annual Conference of ICT, Karlsruhe, FRG, v24(1997).
- 16) N. Kubota, J. Kimura, AIAA J., 15, P.126 (1976).

## A study of response mechanisms of gun propellants at Bullet impact

Haruyuki ARISAWA\* and Jun-ichi KIMURA\*

A small scale and pressure-monitoring bullet impact test was conducted for two types of gun propellants (double base and triple base propellants). The grain sizes and the surface conditions of the gun propellant test samples were varied to investigate the response mechanism of the gun propellant at bullet impact. Results shows the bullet impact response of the gun propellant depends on the grain size, the surface conditions (the surface coating), and hot fragments produced from rear-wall of a test vessel. Increase of the grain size and graphite surface coating reduces the degree of response at the bullet impact. These results strongly suggest that more strict description of bullet impact test procedure is necessary in future research of new gun propellant compositions which have minimum bullet impact responses.

(\*Propellants and Explosives Laboratory, The First Division, The First Research Center, Technical Research and Development Institute, Japan Defense Agency, 2-2-1 Nakameguro, Meguro, Tokyo 153-8630, Japan)

---