

打揚煙火の筒内圧力特性および打上げ速度

丁大玉*[†], 檜垣守正*, 大木雄造*, 吉田忠雄*

*足利工業大学 工学部 機械工学科 〒326-8558 栃木県足利市大前町 268-1

[†]Corresponding address: dding@ashitech.ac.jp

2010年11月25日受付 2011年3月25日受理

要旨

本研究では、小型鋼管を用いて、発射体を筒に入れない密閉状態と開放状態および発射体を筒に入れた状態での筒内圧力を4つの圧力センサーで測定した。圧力が音速で伝わるため、筒内底部における揚葉の燃焼ガスによる圧力の変化は瞬時に筒口まで伝わる。密閉状態では、燃焼ガスの流失がないため、筒内全域の圧力分布は均等で、勾配が生じない。開放状態では、ガス流失があるため、圧力の勾配が生じる。煙火玉のような発射体を打ち上げるとき、玉と筒との隙間から燃焼ガスが流失するため、発射体を境にその前後の圧力分布が複雑となる。また、3号煙火玉を打ち上げるときの筒内圧力を測定した。筒内底部における圧力—時間カーブから圧力上昇速度—時間カーブを求め、筒内の燃焼ガスの複雑な流れを定性的に解析した。最後に、筒から燃焼ガスの流失が多い場合でも、4つの圧力センサーで得られた圧力—時間カーブから計算した打上げ速度は実験値に近い。

1. 緒言

前報¹⁾では、打揚煙火の筒内圧力を筒の底部と上部の2ヶ所で計測し、得られた2つの圧力—時間カーブから、燃焼ガスの流出を定性的に分析し、筒内における玉の運動に及ぼす揚葉の燃焼ガス流出の影響を検討した。燃焼ガスの流出量が少ない場合、筒内における圧力により打上げ速度を求めた。計算結果は実験結果と一致し、計算精度は良好であった。しかし、燃焼ガスの流出量が多い場合、筒内の圧力は筒軸方向に沿って変化するため、煙火玉に働く圧力は筒に固定している圧力センサーで測定した圧力と等しくならず、筒内における玉の運動を正確に解析することはできない。

揚葉の燃焼により筒内の圧力が急速に上昇する。玉と筒内底部との間の空間に密閉度が高いほど圧力および圧力上昇速度が高くなり、打揚筒や煙火玉の破裂などの事故が起こる危険性がある。煙火玉を安全に打ち上げるために、玉と打揚筒との間に一定以上の隙間を確保しなければならない。大きい煙火玉を打ち上げるには揚葉量が多いため、玉と筒との隙間も大きい。したがって、筒内圧力を調べるには隙間からの燃焼ガス流失による影響を考慮しなければならない。

本論文では、煙火玉や煙火星を打揚筒に入れない密閉状態と開放状態での圧力分布、および煙火玉を打ち上げるときの筒内圧力と燃焼ガスの流れとの関係を調べる。また、筒内圧力—時間カーブから圧力上昇速度—時間カーブを求め、筒内圧力の変化と煙火玉の運動および燃焼ガスの挙動との関係を分析する。最後に、筒から燃焼ガスの流失が多

い場合でも打上げ速度を良好な精度で求められる方法を検討する。

2. 実験

2.1 サンプル

打揚煙火の筒内圧力特性を調べるために、小型鋼管打揚筒および3号煙火玉用打揚筒を用いて実験を行った。

揚葉 (Lifting charge) として黒色小粒火薬を用いた。

実験用サンプルについて、小型鋼管実験では外径の異なる数種類の球形煙火星を用いた。予備実験としては、後に述べる実験方法で点火玉、揚葉と煙火星をそれぞれ小型鋼管にセットした後、耐水ビニル袋で包んで水槽に設置し、発射実験を行った (Fig. 1の左の写真)。発射された煙火星が一旦着火されても水槽中で水によりすぐ鎮火された。星をすぐに回収し自然乾燥した。煙火星の写真をFig. 1の右に示し、その直径と質量については発射前それぞれ15.8 mmと2.98 gで、発射後はそれぞれ15.5 mmと2.84 gである。したがって、煙火星が筒口から出るまでに、筒内での滞在時間が非常に短いため、その直径や質量はほとんど変化しないことが分かった。

3号球形煙火玉の打上げ実験では、地元の須永花火株式会社から提供された3号煙火玉を使用した。3号玉の諸特性および揚葉量をTable 1に記す。煙火玉および揚葉の実物写真をFig. 2に示す。計量した揚葉はあらかじめビニル袋に詰めて、点火玉を揚葉中に挿入し、紐で袋の口を縛って点火玉が抜けないようにした。煙火玉が筒から出た後、ある高度 (ほぼ頂点) に達したら爆発する。筒から出

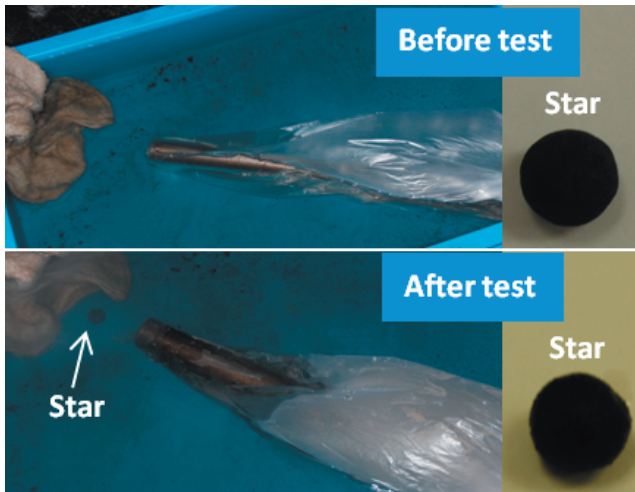


Fig. 1 Shooting test setup (left) and firework star (right).

Table 1 Samples used for the experiments with No.3 shell in a mortar.

No.	Shell mass (g)	Shell diameter (mm)	Lifting charge (g)	Gap ratio
1	308	88.2	35	4.0%
2	304	88.2	35	4.0%
3	305	87.6	35	5.3%
4	307	87.6	25	5.3%
5	304	88.8	25	2.6%
6	304	88.2	25	4.0%
7	305	87.6	25	5.3%
8	305	87.6	15	5.3%

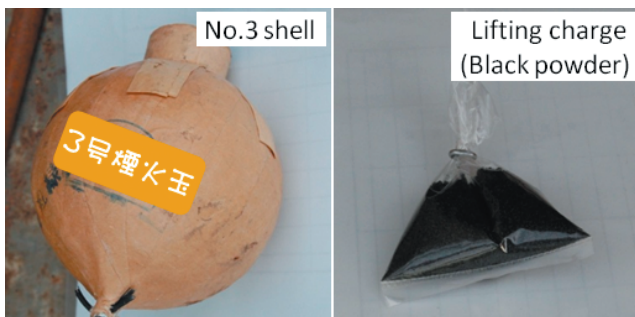


Fig. 2 Photos of No.3 shell and black powder used for lifting charge.

るまでの間には、煙火玉の質量と直径は変化しない。本研究では、筒内圧力と煙火玉の運動などの物理現象を調べることを主な目的とし、実験に使用した煙火星の組成や煙火玉に詰めた煙火星の種類、割薬の組成は筒内圧力や玉の運動に影響を与えないため、詳細の記述を省略する。

以降、実験に用いた煙火玉や煙火星を発射体 (Projectile) と呼ぶ。

球形発射体が打揚筒と密着していないので、その隙間の大きさを以下の式で表す。式(1)で求められた δ を間隙率 (Gap ratio) と呼ぶ。

$$\delta (\%) = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) \times 100 \quad (1)$$

ここで、 D は打揚筒の内径、 d は球形発射体の外径であ

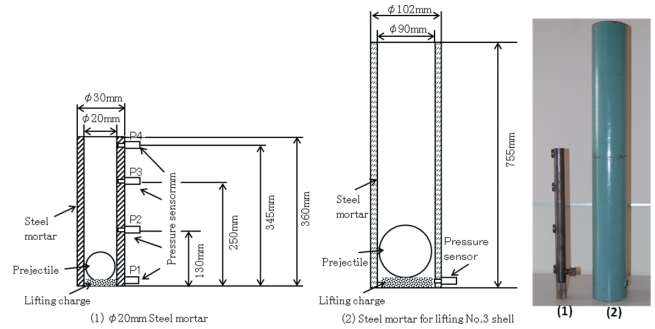


Fig. 3 Sizes of mortars, positions of pressure sensors and the photos.

る。

2.2 実験装置

打揚筒について、安全上の理由から、密閉状態と開放状態での筒内圧力を調べるのに内径 20mm×深さ 360mm の小型鋼管を用いた。なお、揚薬量は数g程度である。また、揚薬量を 35gまで変えて筒内圧力を調べるには 3号煙火玉打上げ用鋼管を用いた。

小型鋼管の軸方向に沿って筒側面に異なる 4ヶ所に圧力センサーを取り付け、圧力を計測した。3号煙火玉の打揚筒にはその底部に圧力センサーを取り付け、同様に圧力を計測した。打揚筒の寸法、圧力センサーの取り付け位置および実物写真をFig. 3に示す。

筒内圧力はひずみゲージ式圧力センサー (KISTLER(株)製、型式7001)を用いて、チャージアンプ (KISTLER(株)製、型式5011B10Y26)を介してデジタルオシロスコープ (横河電機(株)製、型式DL1640L)に記録された。

また、打揚筒から約 20m離れたところで高速度カメラ (ノビテック(株)製 Phantom V4.3)を設置し、筒から出た発射体の運動軌跡を撮影した。高速度カメラの設定条件は画面の画素数が横 256×縦 512ピクセルで、撮影速度が 600コマ s^{-1} であった。

2.3 実験方法

打揚筒を地面に垂直設置し、電気点火玉と揚薬を筒の底にセットし、その上に発射体を入れた後、点火玉に通電する。通電により揚薬が燃焼し、発射体が打ち上げられる。同時に圧力測定装置と高速度カメラのトリガーを作動させ、筒内の圧力および筒から出た発射体の運動軌跡を計測した。高速度カメラの画像を再生し、画像座標を実座標に換算し、各時刻における実座標により発射体の速度を求めた。燃えている揚薬の煙は発射体より先に筒口から出るため、筒口から飛び出る発射体の運動様子を撮影することはできないので、高速度カメラの画像から求めた発射速度は筒口に到達するときの速度と異なる。筒から飛び出た発射体を撮影した画像の 1例をFig. 4に示す。煙から確認できた発射体の位置は筒口から約 0.8mである。著者らは打揚煙火の筒外弾道を数値計算により調査した²⁾が、同じ計算方法を用いて、Fig. 4に示した球形煙火星を例として、空気抵抗 0.3~0.5を入力して計算した結果、煙火星が筒口から 80 $m s^{-1}$ の発射速度で 1m運動しても、その速度

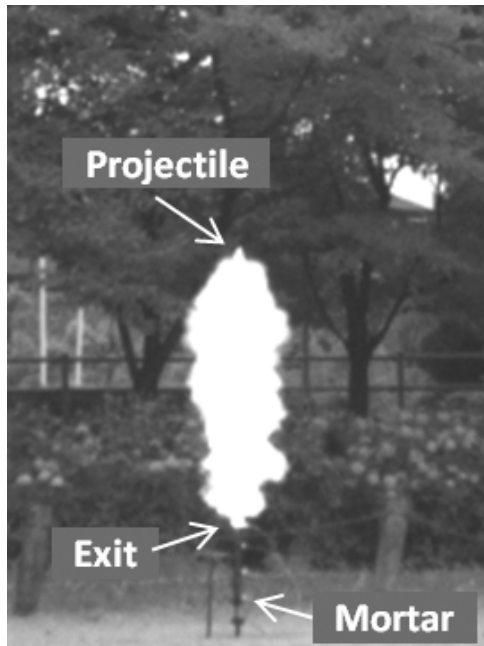


Fig. 4 Photo of traveling projectile from a steel mortar.

の減少は 1 m s^{-1} 未満で、筒口における速度と筒口から 1 m 程度離れたところでの速度との差はわずかである。ここでは、煙から見え始めた発射体の運動軌跡から求めた速度を近似的に筒口速度 (Muzzle velocity) または打上げ速度とする。

筒口を閉じた密閉状態での実験は、発射体を筒に入れず、筒内圧力のみを計測した。

3. 結果と考察

3.1 燃焼ガスの流れと筒内圧力の分布

煙火玉と打揚筒の内壁の間には隙間が存在するため、その隙間から燃焼ガスの流失が生ずる。したがって、筒内の燃焼ガスの流れおよび圧力の変化はより複雑となる。筒内圧力特性を定性的に評価するために、本研究では、(1) 発射体を小型鋼管打揚筒に入れず、筒の筒口が閉じられている密閉状態、(2) 発射体を筒に入れず、筒口が開かれている開放状態、および(3) 発射体を筒に入れて、打ち上げるときの筒内圧力を 4 つの圧力センサーで同時に計測し、筒内の圧力を調べた。

(1) 筒口が閉じられている筒内圧力

密閉状態での筒内圧力を測定する実験では、万一の筒破裂に備え、揚薬として黒色小粒火薬を 1.0 g 使用し、筒口をゴム栓で封じた。点火後、筒内圧力が高圧になったときゴム栓が抜ける。筒の軸方向に沿って 4 ヶ所で測定した圧力-時間カーブを Fig. 5 に示す。図中の点 A はゴム栓が抜けた瞬間である。ゴム栓が抜ける前、筒は密閉状態で、4 ヶ所で測定した圧力が完全に一致した。ゴム栓が抜けた後、圧力が解放され、燃焼ガスの流失により 4 ヶ所の圧力はそれぞれ一致しなかった。

黒色火薬が燃焼すると大量の燃焼ガスが発生し、筒内圧力が生ずる。その圧力は音速と同じ速度で空間を伝播する。燃焼ガスの温度が高いため、その音速は常温下での音速より速い¹⁾。筒の長さ L と音速 c の比率は非常に小さいため、

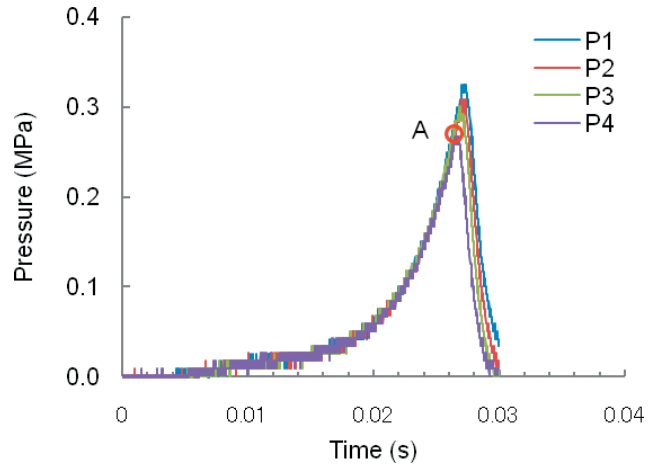


Fig. 5 Pressure-time curve in a closed mortar.

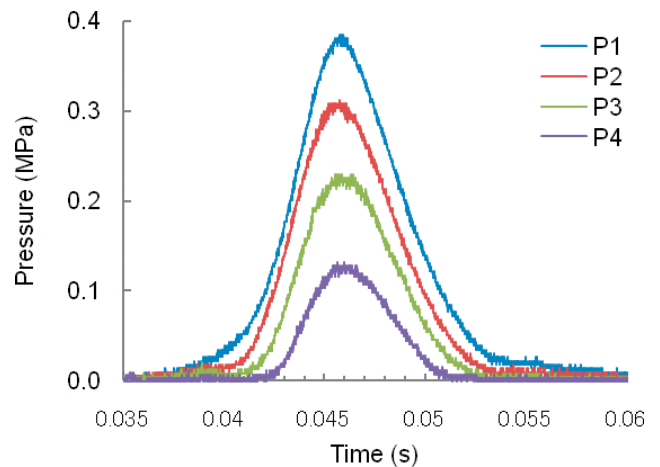


Fig. 6 Pressure-time curve in an opened mortar.

燃焼ガスの圧力はほぼ瞬時に筒内の全域に到達する。Fig. 5 の実験結果は、密閉状態での燃焼ガスが流失しないため、同じ時刻において、密閉空間の全域における圧力は均等であること、即ち密閉状態では、圧力が時間とともに変化するが、圧力の空間分布は均等であることを証明している。

(2) 筒口が開いている筒内圧力

小型鋼管打揚筒の筒口を開放したままで、発射体を入れず、黒色小粒火薬 2.0 g を筒の底部にセットした。点火後の筒内圧力-時間カーブを Fig. 6 に示す。筒底部の燃焼ガスが筒口へ流れ、外部に流失するため、4 ヶ所で測定した圧力はそれぞれ異なった。筒口に近いほど、圧力が小さい。すなわち、筒軸に沿っての圧力の分布は均等ではなく、圧力の勾配が生ずる。筒口が開いても、圧力の伝播速度が音速と同じであるため、同一時刻における筒内圧力は空間的に異なるが、圧力は同様な傾向で変化する。底部の圧力が上昇 (低下) すると、他のところでの圧力もほぼ同時に上昇 (低下) する。底部の圧力が最大値に達すると、他の所の圧力もほぼ同時に最大値に達する。

(3) 発射体を打ち上げるときの筒内圧力

発射体を打ち上げるとき、発射体と筒との隙間から燃焼ガスの流失、および発射体の運動によって、筒内圧力分布は複雑となる。実験結果の 1 例を Fig. 7 に示す。このような筒内圧力特性については前報¹⁾で述べたが、ここでは簡単に説明する。燃焼ガスの流失がある場合、同じ時刻に

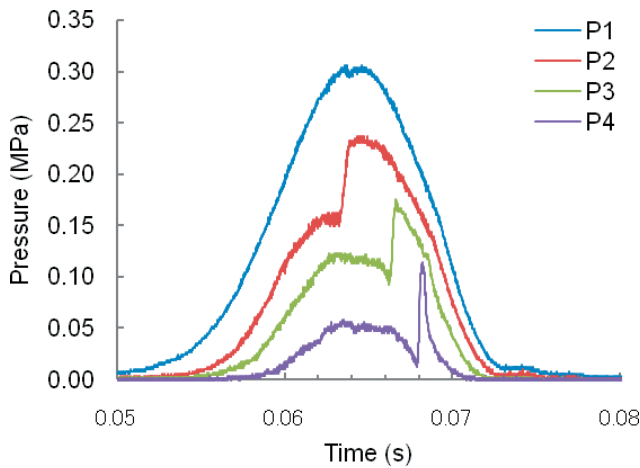


Fig. 7 Pressure-time curve in a mortar for lifting a sphere projectile.

において、筒内圧力の勾配が生じる。特に、間隙率が大きく、燃焼ガスの流失が多い場合、発射体を境にその前後の圧力分布が大きく異なる。筒の側面に固定した圧力センサーで測定した圧力は実際に発射体に作用している圧力と異なる。発射体がある圧力センサーを通過する瞬間、このセンサーで検知した圧力-時間カーブには急な圧力上昇（ほぼ垂直線）が現れる。この圧力の急速変化の幅は発射体の両側に働く圧力差である。ただし、間隙率が小さく、燃焼ガスの流失がかなり少ない場合、発射体と筒底部との空間はほぼ密閉状態となり、筒軸方向における圧力の勾配はほとんどない。発射体の後方に作用する圧力は筒底部での圧力とほぼ同じである。

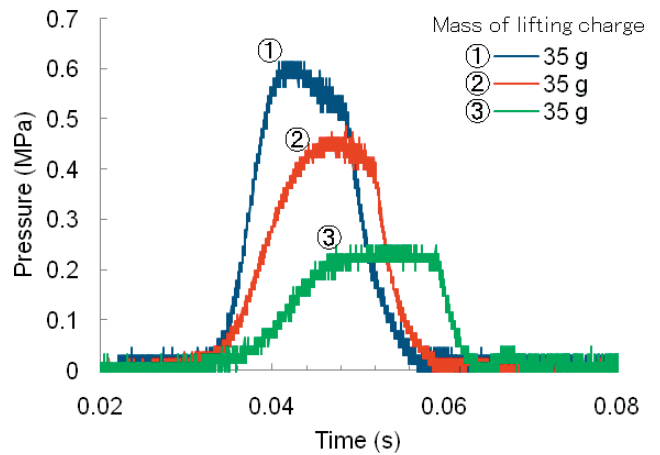
打揚筒が密閉状態であっても、開放状態であっても、燃焼ガスにより生じた圧力が瞬時に筒内の全域に伝わるが、同じ時刻において、燃焼ガスの流失がなければ筒内圧力分布が均等となり、燃焼ガスの流失があれば、圧力の勾配が生じる。

3.2 筒内圧力と圧力上昇速度

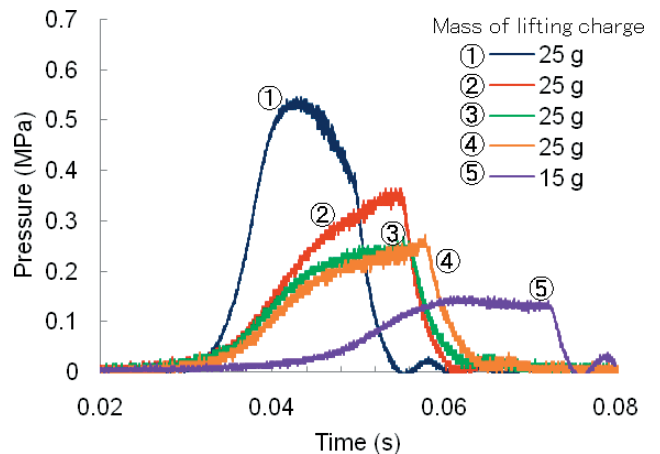
3号煙火玉の打上実験では、打揚筒の底部に設置した圧力センサーにより筒内圧力を測定した。揚薬量をそれぞれ15g、25gと35g使用したときの圧力-時間カーブをFig. 8に示す。

揚薬量が同じでも、得られた筒内圧力はばらつきが大きい。これは点火玉の燃焼のばらつきおよびビニル袋に詰めた揚薬の状態がそれぞれ異なるためと考えられる。揚薬の燃焼ガスにより圧力が発生する。このため、同じ揚薬量でも、燃焼波面と燃焼速度が変わると、得られる圧力-時間カーブは異なる。揚薬である黒色小粒火薬の燃焼の速さは、個々薬粒の表面から内部に向かう線燃焼速度と燃焼火炎が粒子間の空隙を通し、全ての薬粒までに伝わる火炎伝播速度からなるものである。他の報告³⁾によれば、黒色小粒火薬については、線燃焼速度 0.4 m s^{-1} （大気圧下で）に対して、火炎伝播速度は 60 m s^{-1} と非常に速い。したがって、点火玉の燃焼のばらつきや黒色小粒火薬をビニル袋に詰める状態、あるいは薬粒間の空隙状態は火炎伝播速度に大きな影響を与える。

揚薬量 25gを用いた 2 回の実験結果 (Fig. 8(b)中の印



(a) 35g lifting charge



(b) 15g and 25g lifting charge

Fig. 8 Pressure-time curves in a mortar for lifting No.3 shells.

①と②のカーブ)をFig. 9に示す。圧力-時間カーブおよび圧力上昇速度-時間カーブをそれぞれ青線と緑線で表示する。圧力上昇速度を求めるには、圧力-時間カーブを微分した。圧力測定でのサンプリングレートは 10000 s^{-1} である。サンプリングタイムが微小のときこれをもとに微分するとノイズが大きく圧力上昇速度変化の持つ本質はつかみにくい。これを解消するには、まず、単純移動平均法⁴⁾というデータ処理方法を用いて、圧力-時間カーブのノイズを大きく低減させた。次に、このようにデータ処理後の圧力-時間カーブを微分した。本研究では、単純移動平均法で処理した圧力-時間カーブ P_f をFig. 9(a)またはFig. 9(b)に赤線で示す。

点火後、揚薬が燃え始め、燃焼ガスが生成し、筒内圧力が上昇する。一方、燃焼生成ガスの圧力により煙火玉が上昇し始めると、煙火玉と筒底部の空間が徐々に広がり筒内のガスが膨張する。同時に、ガスの一部は玉と筒との隙間から流失している。また、筒の内壁などの伝熱により熱損失が発生する。ガス膨張やガス流失、または熱損失などにより、筒内圧力が低下する。Fig. 9(a)に示した筒内圧力の時間的な変化は燃焼ガスの発生とガス膨張・流失、熱損失という複雑な物理現象が同時に起こった結果である。ただし、ガス膨張やガス流失に比べて、伝熱が遅いため、筒内圧力におよぼす伝熱の影響が小さいと考えられる。以下の解析では伝熱などによる熱損失の影響を無視する。

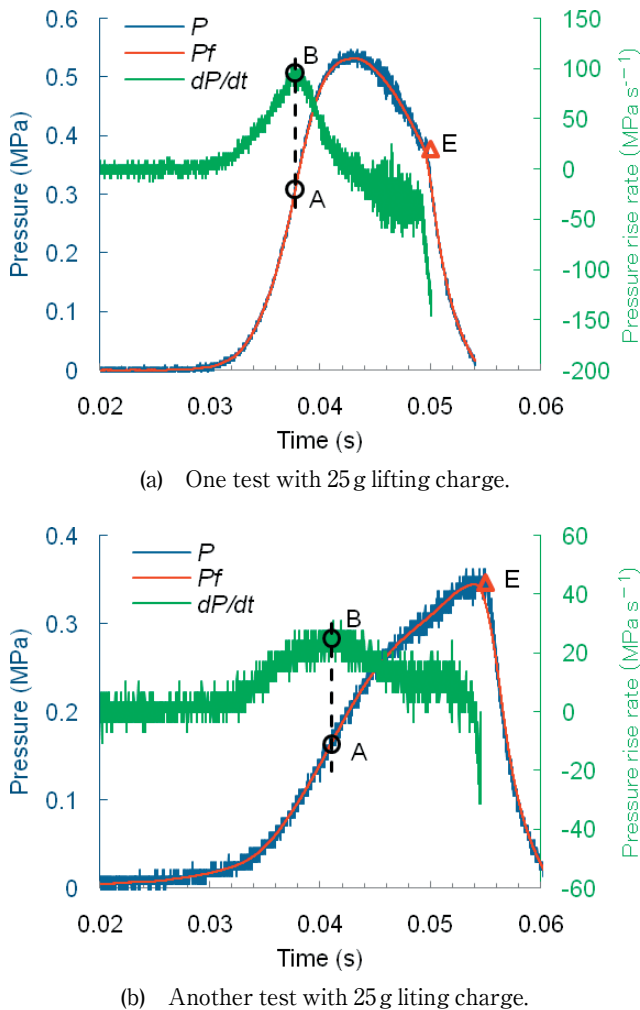


Fig. 9 Pressure and pressure rise rate–time curves in a mortar for lifting a No.3 shell.

点火後の初期段階には、燃焼ガスが大量に発生するため、筒内圧力が急速に上昇し、圧力上昇速度 dP/dt も揚薬の燃焼とともに高くなる。一方、煙火玉が筒内圧力により動き始めると、筒内のガスが膨張し、同時にガスが隙間から流失している。しかし、この段階では、燃焼生成ガスによる圧力上昇の速さはガス膨張または隙間からのガス流失による圧力低下の速さよりかなり速いので、圧力上昇速度 dP/dt は時間とともに増加する。その後、圧力がある値に達したとき、圧力上昇速度 dP/dt が最大に達する。圧力上昇速度–時間カーブ上の最大値 $(dP/dt)_{\max}$ (図中のB点) は圧力–時間カーブ上の変曲点 (図中のA点) に対応する。この変曲点においては、燃焼生成ガスによる圧力上昇の速さとガス膨張・流失による圧力低下の速さとの差が最大となる。変曲点Aの後、圧力の上昇が鈍くなり、圧力上昇速度が時間とともに低下し始める。これは煙火玉がかなり加速され、燃焼生成ガスによる圧力上昇の速さとガス膨張・流失による圧力低下の速さとの差が徐々に縮んでいくためである。

煙火玉がさらに加速し、ある速度に達すると、燃焼生成ガスによる圧力上昇の速さとガス膨張・流失による圧力低下の速さとの差はゼロとなる。即ち、燃焼生成ガスによる圧力上昇の速さはガス膨張・流失による圧力低下の速さと等しくなる。この瞬間、筒内圧力が最大値 P_{\max} に達し、圧

力上昇速度 dP/dt はゼロとなる。圧力が最大値 P_{\max} に達しても、揚薬はまだ燃えていることが分かる。このとき、煙火玉がまだ筒から出なければ、玉の運動により筒内のガスが引き続き膨張・流失するため、圧力が低下し始める。その後、ある時刻になったら、燃焼が終了してしまう。玉が筒から出た瞬間、筒内ガスが一気に解放され、圧力が急に低下する。図中の点Eは玉が筒から出る瞬間を示す。このときの圧力上昇速度–時間カーブには不連続の点が現れる。Fig. 9(a)に示したような圧力–時間カーブから、玉が筒から出る時、揚薬の燃焼が終了したかどうかを判断することはできない。

Fig. 9(b)に示した圧力–時間カーブは、前述と同じ物理現象が現れているが、この圧力–時間カーブにはFig. 9(a)の圧力–時間カーブのような最大圧力が現れない。すなわち、煙火玉は圧力上昇の途中 (図中の印E) で筒から出てしまった。このとき、燃焼生成ガスによる圧力上昇の速さは依然として筒内のガス膨張・流失による圧力低下の速さより大きい。この場合は、玉が筒から出る時、揚薬はまだ燃えていることを示している。

同じ揚薬量にもかかわらず、Fig. 9(a)と(b)に示した圧力–時間カーブには大きな差異が現れる。これは前述のような揚薬の燃焼時間のばらつきおよび点火玉の燃焼のばらつきが大きいと考えられる。揚薬としての黒色小粒火薬の詰める状態によって、その線燃焼速度は大きく変わらないが、火薬粒子間の隙間や点火玉の燃焼状況により火炎伝播速度は大きく変化する。したがって、火炎伝播速度あるいは燃焼波面の広がりが変わったため、揚薬の燃焼時間が大きく異なった。

3.3 筒内圧力と打上げ速度

前報¹⁾では、筒内圧力を用いて筒内弾道の解析方法や発射体の打上げ速度の計算方法を報告した。しかし、これらの方法は燃焼ガスの流失が少ないだけで、良好な解析結果が得られるが、燃焼ガスの流失が多い場合、正確な結果を得ることはできない。

ここでは、燃焼ガスが多く流失する場合、発射体に作用する圧力を近似的に求め、打上げ速度をより正確に計算できる方法を検討する。

打揚筒の軸方向に沿う側面に異なる場所で圧力センサーを設置する。発射体が圧力センサーを通過する前後、発射体に作用する圧力をFig. 10中の P_a と P_b で表す。図中の数字 2 で印した圧力センサーで測定した圧力を P_2 と記す。発射体がこの圧力センサーを通過する直前の瞬間に、 $P_a = P_2$ であり、通過した直後の瞬間に、 $P_b = P_2$ である。したがって、4 つの圧力センサーを筒の側面に取り付けている場合、発射体が底部以外の各センサーをそれぞれ通過する瞬間に、発射体に作用する圧力が得られる。すなわち、発射体に働く圧力については 3 つの異なる時刻におけるデータしか得られない。4 つの圧力センサーで測定した圧力–時間カーブの例をFig. 11(a)~(b)に示す。前述のように、圧力–時間カーブにおける圧力がほぼ瞬時に上昇するとき (カーブ上の垂直変化部分) には、発射体がこのセンサーを通過する瞬間である。3 つの時刻にお

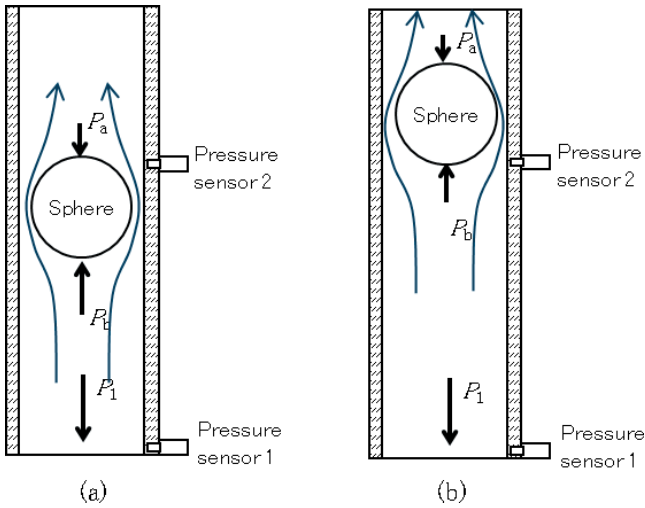


Fig.10 Pressures acting on the surface of a projectile in a mortar.

る圧力—時間カーブ上の垂直変化の前後とそれぞれ接続した曲線をFig. 11(a)~(b)中の赤と青の太線で近似的に作成した。したがって、打ち上げる方向に対する発射体の前方と後方に作用する圧力の全履歴をそれぞれ曲線 P_a (図中の赤の太線) および曲線 P_b (図中の青の太線) で近似的に表示することができる。燃焼ガスの圧力は発射体の表面に垂直作用しているので、発射体を打ち上げる圧力の正味はこの 2 つの曲線の差である。これらの近似曲線で表示する圧力 P_a および P_b を以下の運動方程式に代入し、打上げ速度が求められる。微分方程式(2)の数値計算方法は前報¹⁾で報告している方法と同様である。

$$m \frac{du}{dt} = A \cdot (P_b - P_a) - mg \quad (2)$$

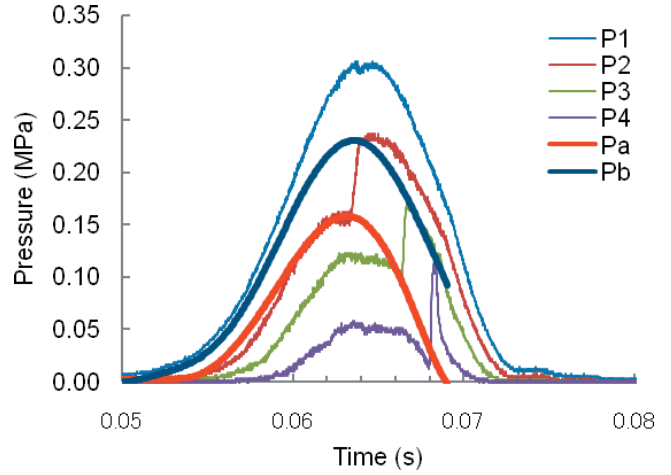
ここで、 m は発射体の質量、 u は発射体の運動速度、 g は重力加速度、 A は発射体の投影面積、 P_a と P_b は運動方向に対する発射体の前方と後方の表面にそれぞれ作用する圧力である。

圧力の近似曲線 P_a と P_b を用いて、式(2)により発射体の筒内運動を解析した結果および高速度カメラで測定した打上げ速度をTable 2 に記す。比較のため、筒底部の圧力 P_1 を用いて打上げ速度を計算した結果を同表に記す。

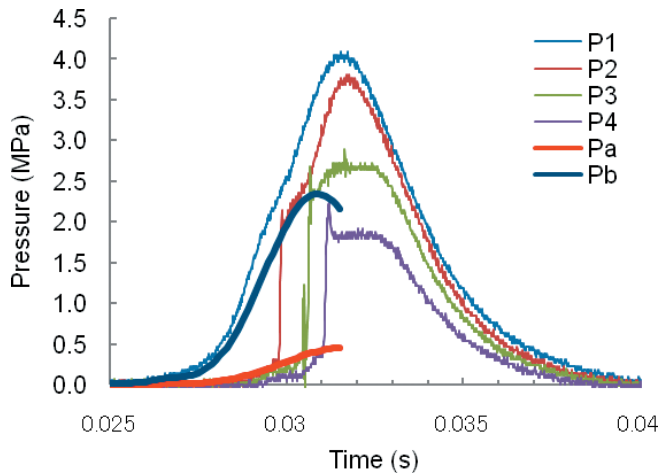
間隙率が大きいほど、燃焼ガスの流失が多い。同じ間隙率でも、揚薬量が多く圧力が高ければ、燃焼ガスの流失も多い。Table 2 中のデータによれば、筒底部で測定した圧力 P_1 だけで求めた打上げ速度は実測値より遥かに高くなり、発射体の運動を正確に解析することができないとわかった。これに対して、発射体に作用する実際の圧力に近似した曲線 P_a と P_b を用いて発射体の打上げ速度を計算した結果は実測値にかなり近い。発射体に作用する圧力の近似曲線を作成する精度を向上すれば、計算した打上げ速度は発射体の実際の運動速度により近くなる。

4. 結論

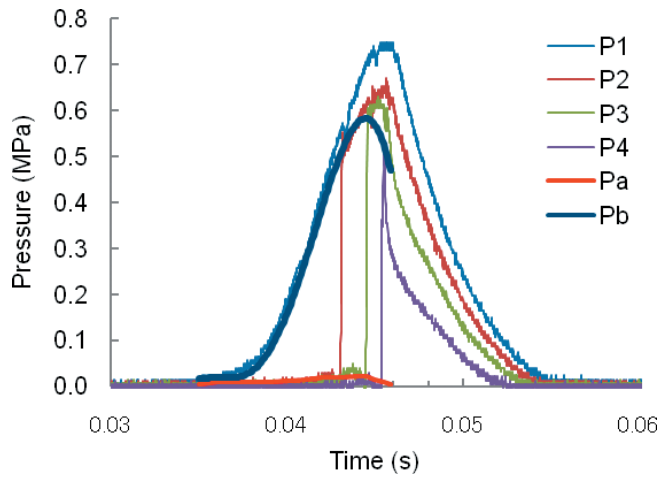
本研究は、打揚煙火の筒内圧力および打上げ速度について、以下の結果と知見を得た。



(a) Gap ratio = 70% and lifting charge mass=2g



(b) Gap ratio = 21% and lifting charge mass=2g



(c) Gap ratio = 21% and lifting charge mass=6g

Fig.11 Pressure-time curves in $\phi 20$ mm mortar with four pressure sensors.

- (1) 圧力が音速で伝わるため、筒内底部における揚薬の燃焼による圧力は瞬時に筒口まで伝わるが、燃焼ガスの流失がない場合、筒内全域の圧力分布は均一であり、ガス流失があれば、圧力の勾配が生じる。
- (2) 計測した筒内の圧力—時間カーブから圧力上昇速度—時間カーブを求めることができた。筒内の圧力および圧力上昇速度の変化から筒内の燃焼ガスの複雑

Table 2 Lifting conditions and muzzle velocity in $\phi 20$ mm mortar.

Projectiles		Lifting charge (g)	Gap ratio (%)	Muzzle velocity (m s ⁻¹)		
Mass (g)	Diameter (mm)			Calculated by P ₁	Calculated by P _b -P _a	Measured by high speed camera
1.0	10.7	2.0	70	265	72	78
4.7	17.6	2.0	21	171	142	135
4.2	17.7	6.0	21	499	260	233

な流れを定性的に解析することもできた。

- (3) 燃焼ガスが筒から多く流失する場合でも、複数の圧力センサーで得られた圧力—時間カーブから打上げ速度をより良好な精度で求めることが可能である。

References

- 1) D. Ding, M. Higaki, Y. Ooki, and T. Yoshida, *Sci. Tech. Energetic Materials*, 67, 164 (2006).
- 2) D. Ding, Y. Ooki, M. Higaki, and T. Yoshida, *Sci. Tech. Energetic Materials*, 68, 14 (2007).
- 3) S. Hatanaka, *Explosion*, 11, 2 (2001).
- 4) T. Mada, *Reports of Research Institute for Applied Mechanics*, No.85, pp.55–62, (1999), Kyushu University.

Characteristics of the pressure in a mortar and the muzzle velocity of a firework shell

Dayu Ding^{*†}, Masamori Higaki^{*}, Yuzo Ooki^{*}, and Tadao Yoshida^{*}

Pressure produced by burned lifting charge was measured in a closed or an opened small mortar without projectile using four pressure sensors in the research. The change of pressure at the bottom of a mortar, where the lifting charge is set, will instantly cause the change of pressure everywhere in the mortar because pressure propagates with speed of sound. Pressure gradient doesn't occur if the burned gas doesn't flow out, but pressure gradient occurs in the mortar otherwise. The pressure before and behind the projectile in the mortar is more complex when the burned gas flows out through the gap between projectile and mortar. Further, with measured pressure–time curve at the bottom of mortar for lifting No.3 firework shell, the pressure rise rate–time curves were calculated, and with these results the complex flow of burned gas was discussed. Finally, with measured pressure–time curves by four pressure sensors, the muzzle velocity can be calculated, and the calculation results are near the experiment results even if a lot of burned gas flows out.

Keywords : firework shell, lifting charge, pressure, muzzle velocity, mortar

^{*}Department of Mechanical Engineering, Ashikaga Institute of Technology, 268–10 mae-cho, Ashikaga-shi, Tochigi 326–8558, JAPAN

[†]Corresponding address : dding@ashitech.ac.jp