

# スラリー爆薬に関する研究 (第4報)

## — 先行圧気体の挙動について —

花崎絏一\*, 宗田安弘\*, 酒井 洋\*\*, 森 伸生\*\*

装薬孔とみだたてた塩化ビニール管の中で1m~2mのスラリー爆薬を爆発させ、管の内壁と未爆轟部分の爆薬との空隙を進行する圧気帯の圧力およびその進行速度と爆速をそれぞれ圧力センサーおよび抵抗線プローブを用いて測定した。その圧力は10~20 MPaであり、その速度は2000m/sから4000 m/sまで条件によって異なり一様でない。爆轟中断が生じやすいように試作した今回の爆薬では圧気帯が爆轟面より約20cm 先行すると爆轟が中断した。したがって、長孔発破の場合圧気帯がよく先行する条件なら爆轟中断が生じる可能性は大きいと考えられる。

### 1. 緒言

近年、鉱山や土木工事などの岩盤掘削現場において爆破効率を高め、適切な発破を行なう為、発破法の改良や制御発破が盛んに実施されるようになってきた。例えば、工期の短縮や、経費節減のために長孔による発破が行なわれるようになってきている。また、制御発破の代表的なものとして、スムーズブラスティングがある。スムーズブラスティングにおいては、爆発による衝撃的な力よりも、主として爆発生成ガスの圧力を岩盤の破壊に利用するので、装薬孔壁と爆薬との間に普通の発破の場合よりも大きな空間を設けなければならない。そのため、この空間（以下チャンネルと称す）を爆発生成ガス等により衝撃的に圧縮された空気帯が爆轟波面に先行すると考えられている<sup>1)</sup>。以下、

この爆轟波面に先行する高圧帯を圧気帯と称することにする。この圧気帯は、未反応部分の爆薬に中心軸に向うステップ状の圧縮波を誘起せしめ、爆轟伝播性に悪い影響を与えるという、いわゆるチャンネル効果<sup>2)</sup>を引き起こす原因と考えられるものである。とくに、スラリー爆薬などの低爆速の爆薬を用いてスムーズブラスティングや長孔発破を行なう場合には、チャンネル効果の影響は著しく、爆轟中断を起こす可能性も高いと言える。したがって、チャンネル効果を解明するには圧気帯の挙動をくわしく調べる必要がある。今回は約2mの装薬について軸方向上の4点を選び、各点における圧気帯の進行速度および圧力を実測し、その結果と実験中に生じた爆轟中断との関連性についても検討した。

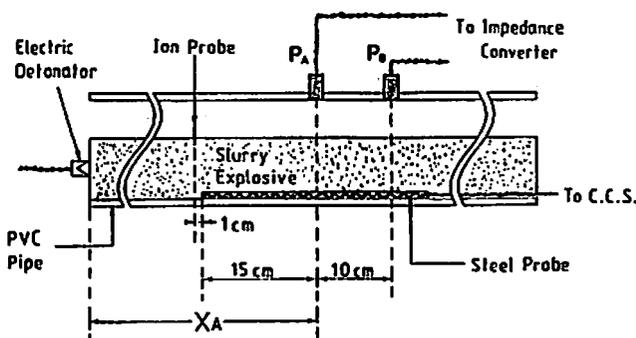


Fig. 1 Experimental arrangement

昭和59年2月7日受理

\*京都大学工学部資源工学教室  
〒606 京都市左京区吉田本町  
TEL 075-751-2111

\*\*日本油脂㈱武豊工場  
〒470-23 愛知県知多郡武豊町西門 82  
TEL 05697-2-1221

### 2. 実験

#### 2.1 実験方法

装薬孔に見たてた塩化ビニールパイプ（以後塩ビ管と称す）に、圧力センサーと抵抗線プローブを設置し、圧気帯の平均速度と圧力および爆速を1測定点（起爆

点から $X_A$ の距離)において同時測定を行なった。

すなわち Fig. 1 に示すように、塩ビ管の内部に管の長さと同じ長さの爆薬を装填し、各センサーを配置した。圧力センサー $P_A$ 、 $P_B$ は、所定の位置( $X_A$ と $X_A + 10\text{cm}$ )の管体にあけた直径8mmの穴に差し込み、接着剤で固定した。その際、内壁より突き出て圧気帯による側圧を受けないようによく注意し、管の内壁に対して垂直になるよう設置した。また抵抗線プローブは、装填前の爆薬に固定した。

管の内径 $d_p$ は30mm, 40mm, 75mmの3種とし、 $X_A$ は20cm, 70cm, 120cm, 170cmの4つの測定点とした(Fig. 2)。これら12種類の計測をそれぞれ秋期(実験Ⅰ)および冬期(実験Ⅱ)の2回にわたって実施した。

使用した爆薬は、爆轟中断が生じやすいように実験用に試作したアルミ入りスラリー爆薬で、装薬に際しては薬包90cmのものを用い、両端を切り落とし継ぎ合わせ、全長にわたって薬径(25mm)の変化がないようにした。

## 2.2 計測機器

### 2.2.1 圧力センサー

製作した圧力センサーには、村田製作所製のPZT圧力素子(7D-5-2000 BA)を加工して用いた。これは直径5mm, 厚さ1mmの円板型で、縦方向共振周波数は2000KHzである。圧力センサーの形状はFig. 3(a)に示す通りである。素子と結線部分の保護及び絶縁性を良くするためにウレタン樹脂を用いて成形し、高周波同軸ケーブル(3D-2V)に接続した。

また、圧力センサーの較正には、水中つるし発破による方法を用いた。すなわち、水中で圧力センサーから70cmの距離において、ペントライト約5gを起爆せしめ、水中衝撃波のピーク圧力に対応する圧力センサーの出力電圧を読みとり、Kirkwood-Batheの式(11式)に薬量 $W$ (0.005kg)および $R$ (0.7m)を代入して得られる圧力値から圧力センサー固有の較正係

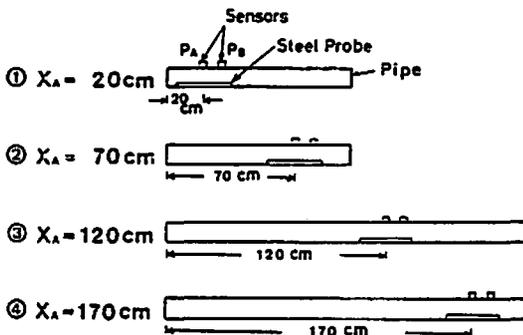


Fig. 2 Measuring points

数を求めた。

$$P = 556 \times (W^{1/3}/R)^{1.13} \quad (11)$$

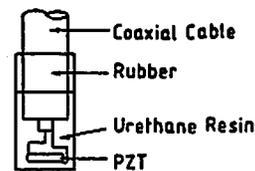
### 2.2.2 抵抗線プローブ

使用した抵抗線プローブの構造をFig. 3(b)に示す。これは単位長さ当たりの抵抗値が一定(約 $3.00\Omega/\text{m}$ )のニクロム合金線(直径0.08mm)に、ナイロン糸をラセン状に巻きつけ、それをスチールチューブ(外径0.55mm, 内径0.30mm)の中に入れたものである。ナイロン糸によってニクロム合金線は、スチールチューブと接触しないようになっている。また、先端では、ニクロム合金線とスチールチューブとがハンダづけされており、一方他端では、ニクロム合金線とスチールチューブに各リード線で定電流源(C. C. S.)へ結線されるようになっており、一定電流(約20mA)を流すことによってそのリード線間の電圧を測定できる<sup>9)</sup>。

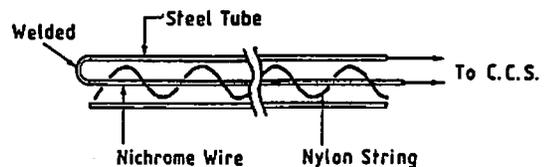
### 2.2.3 測定系統

測定系統のブロック図をFig. 4に示す。2つの圧力センサーの出力は、2チャンネルのトランジェントメモリーに記録させる。圧力素子のインピーダンスが大きいため適当な出力電圧と周波数応答性を得るためインピーダンスコンバータ(ボルテージアンプ)を介した。アンプの周波数特性は400Hz~200KHzである。また、圧力センサーとインピーダンスコンバータをつなぐ高周波同軸ケーブルは、ケーブルの長さによる測定回路の分布容量に変化を与えないよう全実験を通して3mに統一した。

抵抗線プローブには、定電流電源から約20mAの電流を流し、その両端の電圧変化をトランジェントメモリー(DATA LAB)に取り込んだ後、X-Y Recorder



(a)



(b)

Fig. 3 Pressure sensor (a) and resistance steel probe (b).

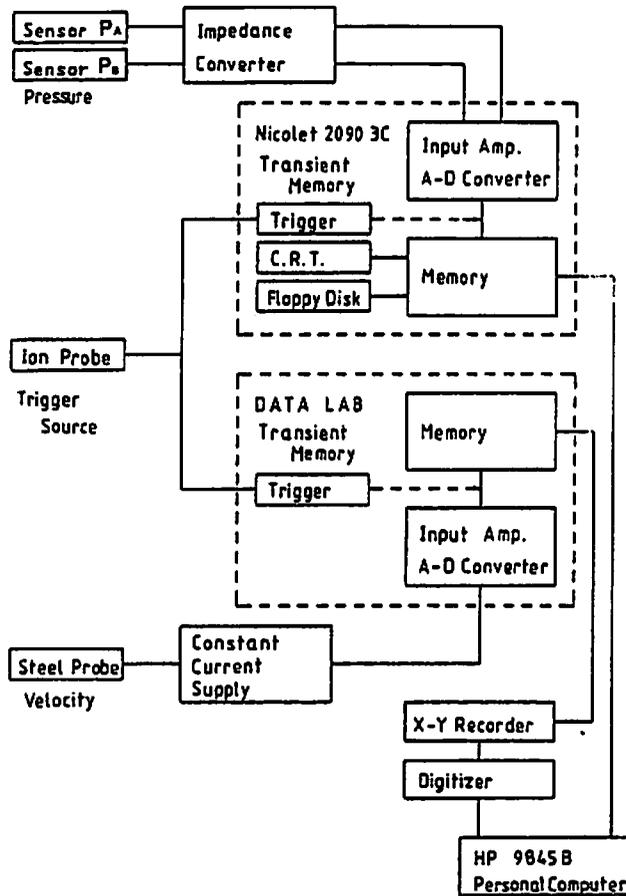


Fig. 4 Block diagram of measuring system.

でグラフ用紙に描かせた。

これらの機器の記録開始トリガーには爆轟波面の到着によって導通すると期待できるイオン探針からの信号を用いることにした。しかし実際には後述するように、圧気帯の到着によってイオン探針が作動したと考えられた。

### 3. 測定結果および考察

#### 3.1 記録波形

圧力センサーと抵抗線プローブの記録波形例(実験Ⅱ  $dp=75\text{mm}$ ,  $X_A=70\text{cm}$ )をFig. 5に示す。上側の2本の記録波形は圧力センサーの出力電圧の時間変化を前述した校正係数を用いて圧力の時間変化に変換したものである。最下段の記録は抵抗線プローブによるもので、実測された出力電圧の時間変化をプローブの短絡位置の時間変化に変換して表示したものである。時間軸の原点は、イオン探針による外部トリガーが作動した時刻である。

圧力センサーの出力の最初の立ち上りは圧気帯の到着によるものであり、その後の持続する圧力は圧気帯

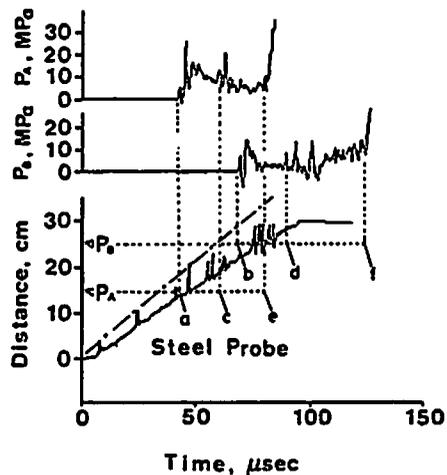


Fig. 5 Records of pressure sensors and resistance steel probe.

の圧力の変化を示しているものと思われる。さらに、波形の右端で急激に圧力値が大きくなりオーバースケールしているのは爆轟ガスがセンサーに到着したもの

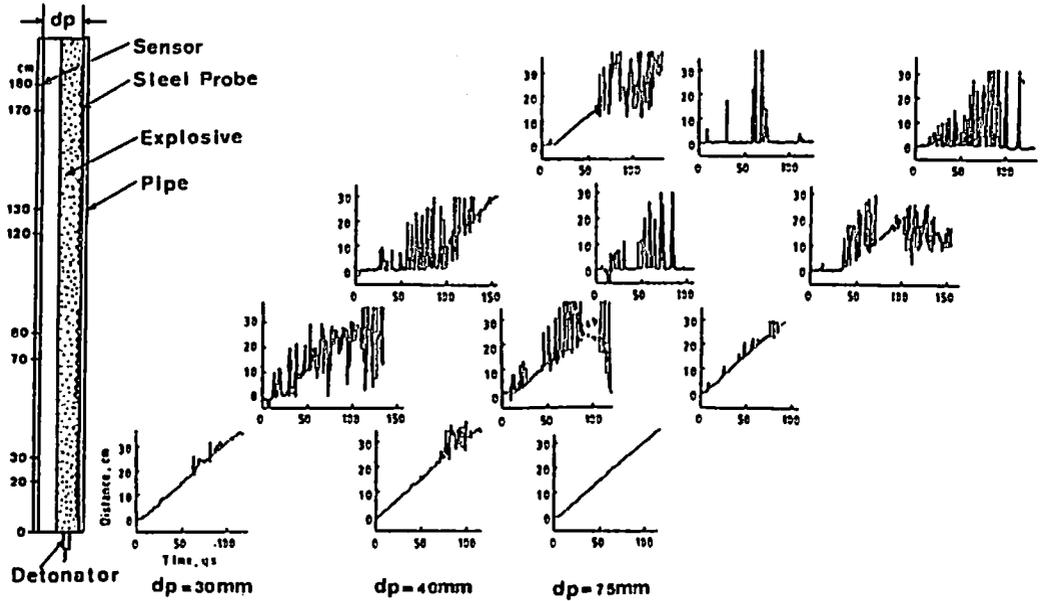


Fig. 6 Profiles of detonation front and compressed air front.

によると考えられる。また、この例では圧気帯の圧力変化の途中に比較的大きいピークが見られるが、この時刻とセンサーの位置の関係を爆轟面の位置の時間的変化図（抵抗線プローブの記録波形）上にプロットした点cと点dを結ぶ直線の勾配は後述する爆轟面の速度（爆速）とほぼ一致することから、このピークは爆轟によって空中に投射される衝撃波によるものではないかと考えられる。さらに、爆轟ガスと思われる部分について同様に求めた点e、点fから推察すれば爆轟ガスの前面は孔軸とかなり小さい角度をなしていると考えられる。

つぎに抵抗線プローブの波形は前節で述べたように爆轟面の位置の時間的変化を表わし、その勾配は爆速を表わす。さらにところどころに現われているパルス状ノイズの頂点を結んだ線（鎖線）の勾配はセンサーAとBの間を通過する圧気帯の速度（直線a-bの勾配）とほぼ一致していることからパルス状ノイズの頂点は圧気帯波頭面の位置の時間的変化を断続的に表わしていると考えられる。これは抵抗線プローブの内芯と外管が圧気帯の圧力によっても一時的に外管の弾性限界内で接触しているものと思われる。このことから孔口から同一距離の圧力センサーと爆薬表面とは圧気帯の到着時間が異なることになり、圧気帯の波頭面も装薬孔の軸に対して傾いていることがわかる。さらにこの考察が正しいとすれば図中の鎖線がほぼ原点を通過しているということから、今回の実験で用いた計測系の記録開始トリガーが作動した時刻は圧気

帯の波頭がイオン探針に到達した時刻と考えることができる。

以上のことを考慮して実験Ⅱで得られた抵抗線プローブの記録波形を継ぎ合わせる試みを行なった結果が、Fig. 6である。前節で述べたように個々の記録波形はそれぞれ別個の発破試験であるにもかかわらず圧気帯の進行と爆轟面の進行の関係が大きな矛盾なく表わされておりこれら個々に行なった実験は再現性のよいものであることがわかる。また、 $dp=40\text{mm}$ および $dp=75\text{mm}$ の場合、それぞれ孔口から約90cmおよび約130cmのところ爆轟中断と思われる波形が認められるが、このときの圧気帯の先行距離が両者とも20cm程度になっていることは興味深いことである。

### 3. 2 圧気帯波頭の速度と爆速

各測定区間の圧気帯波頭の速度を、Fig. 5に示すような圧力波形  $P_1$ ,  $P_2$ のそれぞれの最初の立ち上がり時間の差でその距離（10cm）を除いて求めた。その結果をTable 1およびFig. 7に示す。これを見れば、測定区間が①から④になるに従って、デカップリング係数の如何に関らず速度が落ちて行く傾向が明瞭に出ている。また、デカップリング係数が1.2の場合、速度の落ち込みが大きいのはデカップリング係数が1.6や3の場合に比べてチャンネルがかなり狭く、摩擦によるエネルギー損失の影響を特に受け易いからであると思われる。

つぎに、各測定区間の爆速は抵抗線プローブによる爆轟波面の記録波形を直線で近似させその傾きから求

Table 1 Detonation velocity, compressed air front velocity and the pressure obtained in this study.

Dia. (mm)	Location (cm)	Det. Vel. (m/s)	Air. Vel. (m/s)	Pe (A) (MPa)	Pe (B) (MPa)	Pc (MPa)	Remark
(1.2) <sup>3)</sup>	20—30	3400 <sup>1)</sup>	4390	19.5	8.3	19.3	
		3140 <sup>2)</sup>	—	14.9	—	—	
	70—80	3400	3000	42.1	21.5	9.1	
		3080	3040	23.6	17.9	10.5	
	120—130	—	2010	8.4	5.8	4.0	
		3080	2320	13.7	3.2	5.4	
170—180	3360	3700	21.2	10.7	13.7		
	2910	3890	7.7	21.0	15.1		
(1.6)	20—30	3510	3890	10.0	7.0	15.1	
		3080	—	—	—	—	
	70—80	3200	3640	6.6	6.2	13.2	
		2870	3560	—	5.3	12.7	
	120—130	0	3020	3.2	4.1	9.1	Disc. <sup>4)</sup>
		0	—	—	—	—	Disc.
170—180	3100	2640	7.3	5.3	7.0		
	0	—	—	—	—	Disc.	
(3.0)	20—30	3230	4180	10.3	4.7	17.5	
		2990	3890	2.5	6.7	15.1	
	70—80	3260	3600	21.5	29.3	12.9	
		3140	3850	25.6	13.6	14.8	
	120—130	3070	3770	6.3	12.9	14.2	
		2840	3380	6.6	11.4	11.4	
170—180	0	3330	13.0	10.5	11.1	Disc.	
	0	3420	10.2	8.8	11.7	Disc.	

- 1) Upper line.....Experiment I
- 2) Lower line.....Experiment II
- 3) Decoupling coefficient
- 4) Disc.....Detonation discontinued on the half way

めた。その結果を Table 1 および Fig. 8 に示す。

Fig. 8 によれば実験 I の結果の方が実験 II の結果より爆速が速いことがわかる。これはスラリー爆薬の性能は温度の影響を受けやすいからであろう。また、爆速はデカップリング係数が 1.2 ( $dp=30\text{mm}$ ) の場合にはほとんど爆速の低下が見られないのに対し、1.6 ( $dp=40\text{mm}$ ), 3 ( $dp=75\text{mm}$ ) の場合にはすでに測定区間②, ③で急激に低下しているのがわかる。一般にデカップリング係数が 1.5~2 の場合チャンネル効果の影響を受け易いことが経験的に知られているが本実験においてもデカップリング係数が 1.6 の場合に測定区間③において爆轟中断を起しているため爆速の低下が爆轟中断につながる可能性が大きいことを示している。また温度が低い方(実験 II)がこの傾向が大きいことがわかる。

### 3.3 圧気帯の圧力

圧気帯の圧力波形は測定位置や発破条件によって異った様相を示している。Fig. 5 の例では初動にピークが現われ徐々に圧力が下がっているが、他の例では逆に圧力が上っていくものもある。これは爆轟の伝播中の爆速の微妙な変化に起因するものと考えられる。したがって、ここでは初動付近に現われるピーク圧を実験値  $P_e$  として Table 1 に示した。また、先に求めた圧気帯の速度から一次元衝撃波の理論<sup>4)</sup>をもちいて圧気帯の圧力を試算した計算値  $P_c$  も合せて掲げている。両者を比較するといくつかの例外を除いてかなりよく一致しているものと思われる。すなわち、圧気帯はほぼ一次元衝撃波として扱うことができるように思われるが詳しくは数多くの実験が必要であろう。なお、実験値と計算値が大きく異なる結果については圧

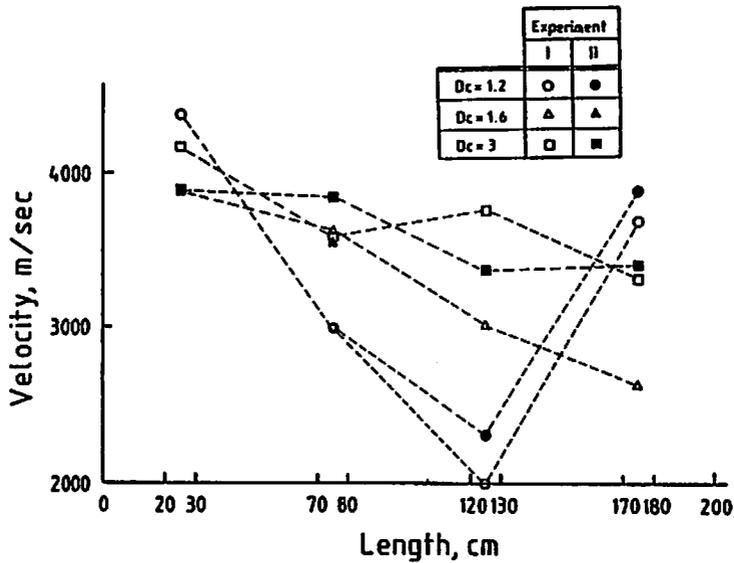


Fig. 7 Mean velocity of compressed air front vs length of detonation.

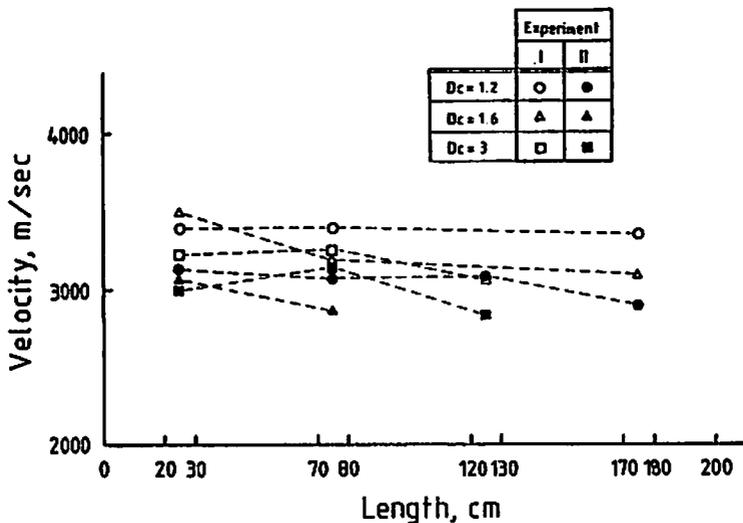


Fig. 8 Mean detonation velocity vs length of detonation.

力センサーのとりつけ状態が悪く、センサーに加わる側圧の影響が大きくなり、正確な値が記録されなかったのではないかとと思われる。とくに  $dp=40\text{mm}$  の場合の実測値は計算値よりかなり低く、この条件では爆轟中断が最も起りやすいことを考えると計算値の値が妥当であろうと思われる。したがって、今回の実験では圧気帯の圧力は  $10\sim 20\text{MPa}$  であるといえよう。

### 3.4 圧気帯と爆轟中断

圧気帯波頭が爆轟面に先行するという事は未爆轟部分の爆薬内に圧力波が中心軸に向って伝播することになり、その圧力によって爆薬内に含まれる気泡が圧

縮されることが考えられる。この圧縮された気泡は条件によっては一時的に hot spot として働かない状態になることがある<sup>5)</sup>。すなわち、中心軸に向う圧力波の伝播が進むにつれて、爆薬としての有効半径が小さくなって行くことになる。この半径がいわゆる限界半径以下に達するまでに爆轟波（正確には衝撃波）が到達すれば爆轟は持続するが、そうでなければ中断することになる。

今回の実験では 3.1 の後半で述べたように圧気帯の波頭の先行距離が約  $20\text{cm}$  になれば中断を生じていること、圧気帯波頭速度が  $3000\text{m/s}$  前後であることおよ

び予備実験により爆薬内の圧力波伝播速度は100m/秒後であることから試算すれば爆薬の有効半径が約12m (25mm-2×20cm×(100m/3000m)) になったときに中断が起っていることになる。

Fig. 6 をみるとデカップリング係数の違いによって、圧気帯が爆轟波より先行し始める時期が異っているが  $dp=30\text{mm}$  のように空隙が小さく壁面の影響を受けやすい場合を除いて遅かれ早かれ先行距離が爆轟中断を起す限界距離に達する可能性がある。今回の実験でも  $dp=40\text{mm}$  では孔口から80cm,  $dp=75\text{mm}$  では孔口から120cmのところ爆轟中断が生じている。従来からデカップリング係数が2前後の場合によく爆轟中断が生じやすいといわれているが、今回の結果ではその係数が3の場合にも生じていることをみれば装薬長が長くなれば大きいデカップリング係数の場合にも起りうるかもしれないことを示しているものと思われる。

#### 4. 結 言

今回の実験で得られた圧気帯の挙動についての知見はつぎのとおりである。

まず、圧気帯の圧力は場所によって一様ではなく時間とともにかなりはげしく変化しており、その大きさは10~20 MPa であろうと思われる。また、その波頭の進行速度も条件によって異なり、同一条件でもその値は時間的に変化をし一様でない。しかし爆轟面と圧

気帯の波頭の距離は時間とともに大きくなって行き、今回の実験ではその距離が約20cmになれば爆轟中断が生じた。しかも、それがデカップリング係数が2および3の場合であったことは今後の研究に興味深いことである。爆轟中断の機構としては、未爆轟部分の爆薬内に伝わる圧力波による hot spot の不活性化がみかけ上、薬径を小さくし、限界薬径を下まわらせるものと考えられる。したがって爆轟中断の定量的な解明には爆薬内の応力波特性、限界薬径の研究などが今後必要となろう。

本研究の一部は昭和57年度(第12回)火薬工業技術奨励金の研究助成金を受けて行なったものである。

#### 文 献

- 1) 明石善作, 及川陸記, 工業火薬協会誌, 31, 75 (1970)
- 2) 中野雅司, 森伸生, 工業火薬協会誌, 40, 291 (1979)
- 3) 佐々宏一, G. Larocque, 工業火薬協会誌, 27, 223 (1966)
- 4) たとえば, 岩本順二郎, 圧縮性流体力学, 共立出版(1980)
- 5) 花崎絃一, 寺田半, 工業火薬協会誌, 42, 161 (1981)

