

## 爆薬駆動円筒爆縮法により生成されたアルゴン・プラズマの挙動

角館洋三\*, 吉田正典\*, 薄葉 州\*, 中山良男\*  
 田中克己\*, 齊木勝敏\*, 藤原修三\*, 宮本昌弘\*\*  
 久保田彰\*\*\*, 田 実\*\*\*\*

円筒爆縮型の爆薬駆動プラズマ発生器を試作し、アルゴン・ガスを衝撃圧縮して得られたプラズマの性質を実験的に調べた。アルゴン・ガス中の衝撃波速度は15km/sであったが、ピストン・モデルを用いてプラズマの流速から求めた値に比較してかなり大きい。単純なモデルでこの現象を説明することはできず、輻射、粘性などを考慮したより精密な解析が必要である。また駆動用の液体爆薬(硝酸ヒドラジンの抱水ヒドラジン溶液)にはプラズマからの圧力波によって圧縮されて爆速が速くなる現象がみられた。

### 1. はじめに

爆薬のもつエネルギーを、パルス・パワー源として利用する方法のひとつとして、希ガスを衝撃圧縮して高磁気レイノルズ数のプラズマを生成し、電磁流体力学的(MHD)発電に利用することが試みられている<sup>1)~3)</sup>。爆薬を利用して発生したプラズマは、通常の放電プラズマよりはるかに高密度にすることができ、その性質も興味深い。また得られるプラズマの体積も大きいので、発電以外にも光源、圧力源などの様々な応用が可能であろう<sup>4)</sup>。

われわれは、円筒爆縮型のプラズマ発生器を製作し、発生したプラズマの性質を調べるために、今回衝撃波パラメータを測定し、その解析を試みた。

### 2. 実験方法

Fig. 1(a)に爆薬駆動プラズマ発生器の構造を示す。ライナー(内径20mm,肉厚1mmのアルミニウム管)の内部に1気圧のアルゴン・ガスを入れ、ライナーを駆動する主爆薬(硝酸ヒドラジン:抱水ヒドラジン=75:

25,重量比)をその周囲に置く。外側はこの液体爆薬の容器で、内径44mmの亚克力管である。Fig. 1(b), (c)に示したように、主爆薬の爆発が左方に進むにつれ、ライナーの円すい状に変形した部分も左方に移動するので、これがピストンの役目をしてライナー内部のガスを一次元的に衝撃圧縮する。ピストンの速度はアルゴン・ガスのマッハ数で約27にもなるので、アルゴンは数万度のプラズマ状態になることが期待される。

爆薬の爆ごう波面の位置は電圧をかけた2本の被覆銅線(60 $\mu$ m径)を捻り合わせて爆薬中に挿入し、イオン・ギャップ法で測定した。ライナー内部の衝撃波面は直接観察できないので、プラズマ発生器からのプラズマ流をライナーと同径の透明なポリカーボネイト管に導き、衝撃波面でのプラズマ発光を回転鏡式高速度カメラを用いたストローク写真法で測定した。このとき同時にこの発光を光ファイバーで光ダイオードに導き、電気信号として記録することにより、写真フィルムでの時間を校正した。プラズマの圧力測定はライナー内面に貼ったカーボン・ゲージで行った。これは炭素の電気抵抗の圧力変化を利用し、圧力による抵抗変化分のみをブリッジ回路により検出するものである。プラズマの流速は、2個のフェライト永久磁石の間の空間に0.10Tの磁場をつくり、この中を流れるプラズマの、磁場および流速に垂直な方向の起電力を測定することにより求めた。圧電ビンは、爆ごう波より先行するアルゴン・ガス中の衝撃波により、爆薬中に誘起された圧力波を検出するためのものである。

### 3. 実験結果と考察

Fig. 2にイオン・ギャップ法で測定された爆ごう

平成元年1月27日受理

\*化学技術研究所

〒305 茨城県つくば市東 1-1

TEL 0298-54-4789

\*\*財 富士電機総合研究所

〒290 千葉県市原市八幡海岸通7

TEL 0436-41-6577

\*\*\*旭化成工業 財

〒100 東京都千代田区内幸町 1-1-1

TEL 03-507-7811

\*\*\*\*ニチコン 財

〒525 滋賀県草津市矢倉 2-3-1

TEL 0775-63-1184

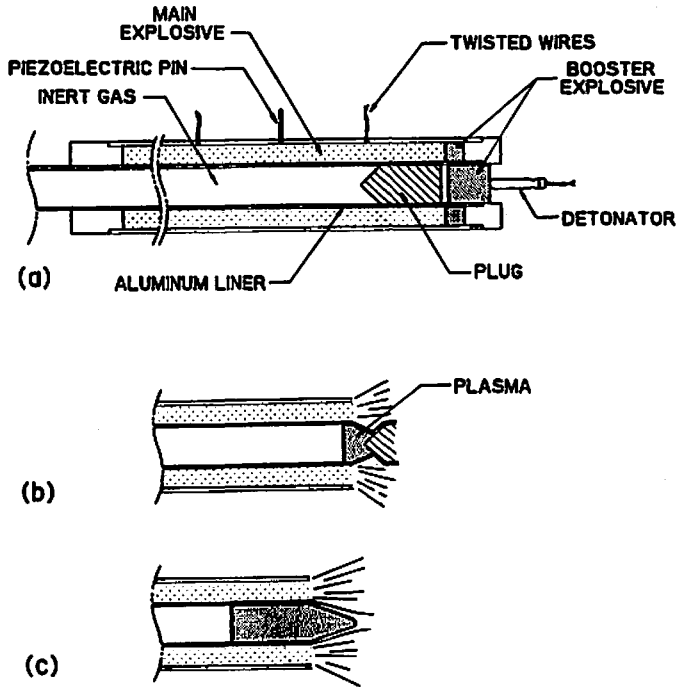


Fig. 1 Experimental assembly (a) and operation principle (b), (c) of explosive driven plasma generator.

波面と、ストリーク写真と光ファイバー法で測定された衝撃波面の位置と時間の関係の例を示す。このライナーの有効長は50cmである。衝撃波速度はプラズマ発生器を出た直前で15.0km/sであり、その後減衰しているのがみられる。有効長が30, 40cmの場合でも射出直後の衝撃波速度は15.0±0.5km/sであった。このときのプラズマ発生器の出口近傍での衝撃波面の通過時刻をFig. 2にプロットしており、これから衝撃波面がまだライナーの内側にある時の速度を推定することができる。その結果は衝撃波速度はほぼ一定 ( $U_s = 15.0\text{km/s}$ ) であることを示しており、この範囲では衝撃波の成長過程はみられなかった。

Fig. 2から求めた爆薬の平均爆ごう速度 ( $U_d$ ) は8.48km/sであり、ライナーがない場合の通常の爆ごう速度8.3km/s<sup>5),6)</sup>に比較して実験誤差を考慮しても明らかに大きい。圧電ピンにより爆ごう波に先行する圧力波が検出されている (Fig. 2)ので、未反応の爆薬がプラズマからの衝撃波により予備圧縮されて密度が高くなったためであると考えられる。なお、同様な爆速の増大化の現象は中空円筒状の固体爆薬の空気中での爆発でも観測されている<sup>7),8)</sup>。本実験で測定された爆ごう速度がChapman-Jouguetの爆ごう速度に等しくな

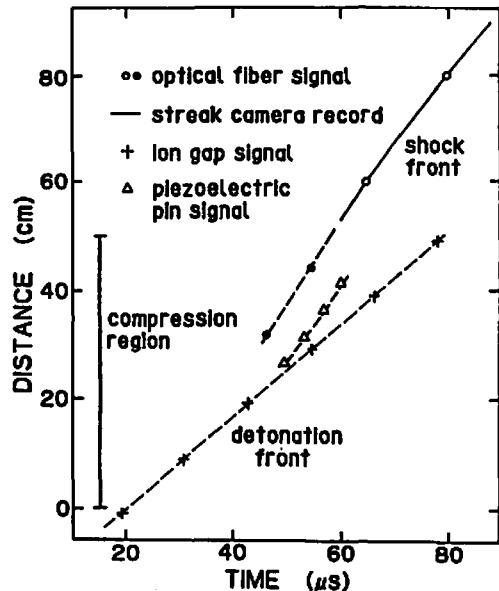


Fig. 2 Time dependences of positions of shock and detonation fronts observed in an experiment of the plasma generator 50 cm in compression length. Solid circles indicate shock fronts in the vicinity of exits of the generators 30 and 40 cm in compression lengths.

るような初期密度を計算で求めると、 $1.42\text{g/cm}^3$ であった。さらに常圧での密度( $1.385\text{g/cm}^3$ )と音速( $2.18\text{km/s}$ )からもとめた体積弾性率より爆薬に加わった平均圧力を見積ると $160\text{MPa}$ になり、後述するプラズマの圧力と矛盾はしない。測定点の各区間で求めた速度のばらつきは大きく、 $8.6\text{km/s}$ 以上の速度が測定された場合もあったが、プラズマから爆薬中に入射した衝撃波の反射、希薄波の影響で空間的にも時間的にも複雑な圧力分布を生じているためであると思われる。

カーボン・ゲージで測定されたプラズマの圧力波形はピーク値 $130\text{MPa}$ を示したが、圧力の上昇過程でゲージが破壊されているので、真の圧力値はもっと高い可能性が大きい。衝撃波の前後での質量流束と運動量流束の連続性から、波面での圧力差は、 $\Delta P = \rho_0 U_p U_p$ で表せる。ここで $\rho_0$ は波面より前の気体の密度、 $U_p = U_d$ としてプラズマの圧力を見積ると $230\text{MPa}$ になる。

磁場中でのプラズマの起電力は $18\sim 20\text{V}$ の範囲であり、電極間距離( $20\text{mm}$ )から $U_p$ を求めると $9\sim 10\text{km/s}$ になる。磁場の空間分布による誤差を考慮すると爆薬の爆ごう速度とほぼ一致している。このことは、ライナーが爆ごう速度に等しい速度で動くピストンとしてガスを押し、一次元的衝撃圧縮をしているという描像(ピストン・モデル)がほぼ成り立っていることを示しているように思われる。

衝撃波速度と流束の比は、非電離理想気体の一次元衝撃波を仮定すると、 $U_p/U_d = (\gamma + 1)/2 = 4/3$ ( $\gamma$ : 比熱比)であるが、 $U_p = U_d$ とした実測値 $1.76$ よりかなり小さい。アルゴンの電離を考慮し、原子、イオン、電子の平衡を仮定して衝撃波パラメータを求めた場合、電離による統計粒子数の増加の効果よりもイオン化ポテンシャルによる温度の低下の効果が大きくなる。したがってプラズマの圧力は電離がないとして求めた値よりも低下するので $U_p/U_d$ はさらに小さくなってしまふ<sup>9)</sup>。また荷電粒子間のCoulomb相互作用も圧力を小さくする方向にはたらくのでこれを説明できない。

一方、前に述べた中空円筒型の固体爆薬の爆発の実験(このとき爆発生成ガスがピストンの役目を果たす)では、内部の空気の衝撃波の速度は $U_d$ の最大 $1.75$ 倍であることが観測されている。この場合先行する空気中の衝撃波により爆薬の表面が高温になって部分反応を起こし、衝撃波へのエネルギーの供給があり得ることが指摘されている<sup>9), 10)</sup>。しかし、今回の実験ではライナーが爆薬とプラズマを隔絶しているので機構はあり得ない。

理想的な一次元圧縮をするにはピストンの先端の形

状は平面でなければならない。しかし変形したライナーは円すい状なので、二次元的な効果があることが考えられる。これを確かめるために二次元数値シミュレーションを、先ずアルミニウム・ライナーの変形について行い(Lagrange型差文法)、次にその結果求めたライナー形状を用いてアルゴン・ガス中の衝撃波について行った(Euler型差文法)。その結果は、ライナーについては定常的な変形でジェットングは見られず、また衝撃波については波面背後で渦の生成が認められたが平均の衝撃波速度の増大速度の増大効果は見られなかった<sup>11)</sup>。

その他、不純物の混入、プラズマの粘性、熱伝導、放射の効果<sup>12) 13)</sup>は定量化が難しいが、これらも考慮しなければならないだろう。特にプラズマからの放射による波面前方にある気体の加熱効果で、前駆波が存在することが知られている<sup>14)</sup>。しかし、通常の衝撃波管で得られる衝撃波速度は通常 $10\text{km/s}$ 以下であり、光イオン化、光励起の効果は小さい。また電磁衝撃波管を用いるとより速い衝撃波速度を得ることができるが、プラズマの密度は低く、また電場の効果も重量されるので実験結果の直接の比較は難しい。

この様な $U_p/U_d$ の大きな値は、類似の実験で必ずしも報告されている訳ではなく<sup>2)</sup>、また中空円筒状爆薬の場合、この値は爆薬の内外径比に依存することが報告されている<sup>10)</sup>。したがってこの現象が装置の幾何学的形状、大きさに敏感に依存している可能性も大きく、その検証が必要である。また精密なモデルに必要な衝撃波中での温度、圧力などのパラメータの空間分布、時間変化の情報が充分得られていない。著者らは放射効果を取り入れたシミュレーションを準備すると共に、発生器の形状効果、プラズマの分光等の測定を行う予定である。

#### 4. 結 論

円筒爆縮型の爆薬駆動プラズマ発生器を試作し、アルゴン・ガスの衝撃パラメータを測定した。衝撃波速度は $15\text{km/s}$ であったが、ピストン・モデルを用いてプラズマの流速から求めた値に比較してかなり大きく、単純なモデルでこの現象を説明することはできなかった。また駆動用の液体爆薬(硝酸ヒドラジンの抱水ヒドラジン溶液)には爆速が速くなる現象がみられた。これはプラズマからの圧力波によって爆薬が圧縮されたためであると説明できる。

#### 文 献

- 1) D. W. Baum, W. L. Shimmin: "Megagauss Physics and Technology", ed. P. J. Turchi (Plenum Press, New York and London, 1979) p. 77.
- 2) S. P. Gill, D. W. Baum, W. L. Shimmin, D. Mukherjee

- : Artech Associates Inc. Final Report FR-119 (1977)
- 3) S. P. Gill, W. L. Shimmin, J. D. Watson : Artec Associates Inc. Final Report FR-190(1984).
  - 4) I. A. Stadnichenko, V. M. Titov, V. P. Chistyakov, G. A. Shvestsov : Comb. Expl. Shock Waves, 18, 335(1982)
  - 5) 村田重夫, 藤原修三, 日下部正夫, 椎野和夫 : 工業火薬協会誌, 37, 316(1976)
  - 6) 日下部正夫, 藤原修三, 椎野和夫, 田中克己 : 工業火薬協会誌, 41, 23(1980).
  - 7) D. W. Woodhead : Nature, 160, 644(1947).
  - 8) D. W. Woodhead, H. Titman; Explosivstoffe, 13, 113; *ibid.*, 13, 141(1965).
  - 9) R. H. Christian, R. E. Duff, F. L. Yager : J. Chem. Phys., 23, 2042(1955).
  - 10) L. A. Merzhievskil, V. M. Titov, Yu. I. Fadeenko, G. A. Shivetsov : Comb. Expl. Shock Waves, 24, 576(1988).
  - 11) 田中克己, 角館洋三, 薄葉州, 吉田正典, 青木勝敏, 藤原修三 : 衝撃波現象の解明と応用に関する企画・調査研究報告書(科研費), No. 63306019(1989).
  - 12) H. D. Glenn, B. K. Crowley : J. Appl. Phys, 42, 5517(1971).
  - 13) R. S. Hawke: "Shock Waves in Condensed Matter 1987" ed. S. C. Schmidt, N. C. Holmes (North-Holland, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, (1988) p. 643.
  - 14) M. A. Liberman, A. L. Velikovich; "Physics of Shock Waves in Gases and Plasmas"(Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, (1986).

---

## Behavior of Argon Plasma Produced by Explosive Driven

### Imploding Cylinders

Yoza KAKUDATE\*, Masatake YOSHIDA\*, Shu USUBA\*  
 Yoshio NAKAYAMA\*, Katsumi TANAKA\*, Katsutoshi AOKI\*  
 Shyuzo FUJIWARA\*, Masahiro MIYAMOTO\*\*, Akira KUBOTA\*\*\*  
 and Minoru DEN\*\*\*\*

Argon gas has been shock-compressed by imploding cylinders driven by a high explosive, hydrazinium mononitrate solution with hydrazine hydrate, to become dense and high temperature plasma. Measured velocity of the shock wave in argon was 15 km/s, which is not consistent with that predicted by simple models where transports and/or dissipations are not taken into consideration. The explosive exhibited enhanced detonation velocity, which can be attributed to the pre-compression of the explosive by the incident shock wave from the plasma.

(\*National Chemical Laboratory for Industry, Higashi 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305.

\*\*Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd., Yawata Kaigandori 7, Ichihara, Chiba 290.

\*\*\*Asahi Chemical Industry Co., Ltd., Uchisaiwai 1-1-1, Chiyoda, Tokyo 100.

\*\*\*\*Nichicon Co., Ltd., Yakura 2-3-1, Kusatsu, Shiga 525.)