

円筒状収束爆轟の特性について

南雲義郎*, 古賀城児*, 松為宏幸*

米田罔昭*, 越 光男*

アセチレン-酸素系の円柱状収束爆轟の起爆条件および中心付近の爆轟伝播の挙動について測定した。 $(C_2H_2)/(O_2)=2/3$ の試料気体では初期圧力54torr以上で対称性の良い円柱爆轟が発生し、起爆誘導距離、伝播速度、3次元セル構造寸法等について伝播距離に対する依存性を検討した。また超高速イメージコンパタカメラを用いて中心付近の伝播速度と収束の様子を詳細に検討した結果、非常に優れた収束性(最小半径、0.2mm以下)を有することが見出され、爆風理論によりその挙動を記述できることが判明した。

1. 序 論

高密度プラズマ、超高压等が発生させ種々の実用的用途に応用する問題と関連して収束爆轟の特性に関する研究が古くから行われて来た^{1)~3)}。もし対称性が非常に優れた収束爆轟を対称中心付近で維持できれば面積効果による自己加速効果も加わるため^{4)~7)}、非常に大きなエネルギー密度を有する集中点を作り出すことが可能となる。しかし現実には非常に小さな半径に収束するまで対称性を維持できるような爆轟波を作り出すことは種々の理由から困難である。中心から十分離れた位置に於て対称性の優れた起爆を実現することが要求され、また中心付近では微小な擾乱に対する安定性が問題となり爆轟波それ自体に固有の3次元構造に基く不均一性や、爆発が伝播する容器壁面の平滑度等が爆轟の収束性を支配する重要な因子となることが考えられる。可燃性予混合気体に於てはある程度対称性が優れた円筒状収束爆轟波を作り出すことはそれ程困難でなく比較的簡単な装置を用いても中心近傍を除いて真円に近い爆轟波面が観測される^{1)~3)}。実験的に最も重要な問題は、中心付近に於てどの程度のスケールで収束が実現されているかを精度良く診断する事である。収束性が良い爆轟波を写真法(こま撮りまたは流し写真)を用いて判定する場合には時間的、空間的に高分解能で撮影を行う必要がある。中心近傍で爆轟の伝播速度は激しく変化するためこれまでに報告された研究成果ではこの点に関する検討を行うには分解能(空間的、時間的)が不十分であると考えられる。

このような中心付近の収束爆轟の挙動は極限で爆風伝播理論により記述される筈である⁸⁾。このような理論の検証という意味に於ても、十分な精度でもって収束爆轟の伝播速度を測定することは未解決の重要な課題の一つであると思われる。以上の観点から我々は、超高速写真撮影が可能なイメージコンパタカメラによる計測を中心として収束爆轟の伝播特性を再検討することにした。興味の焦点は単に中心付近の挙動だけでなく、円筒状爆轟の起爆条件に関する検討や3次元セル構造に関して平面爆轟波と対比する点にも置かれている。

2. 実験装置

Fig. 1に本研究に於て用いた収束爆轟発生装置の一例を示す。基本的には、内径1.2cm 全長155cmの銅管中に可燃性予混合気を導入し管端に於てスパーク放電またはニクロム線加熱により点火すると条件次第では急速に爆轟に転移する。この管の他端は、厚さ2mm、直径23cmのアルミ円板によって内部を等分されている円筒容器(直径24cm、深さ0.8cm)に接続されており爆轟波がこの容器へ入射するとまずしきり円板により反射衝撃波が発生しこれをエネルギー源とししきり円板に沿って等方的に3mm巾の円筒状拡大爆轟が生成される。その伝播速度は2cm間隔で設置された3個のピエゾ圧力計によって計測された。円筒状拡大爆轟はこの円筒容器端において巾5mmの円筒状スリットを通じてしきり板の反射側へまわり込み、次いで収束を開始する。気体の種類、初期圧、スリット巾等によってはこのまわり込みの際に爆轟は停止し単なる収束衝撃波が対称中心へ向けて伝播することもある。本研究に於て当初使用した試料気体は、当量酸-水素混合気、当量メタン-酸素混合気、アセチレン-

昭和62年4月28日受理

*東京大学工学部反応化学科

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

TEL 03-812-2111

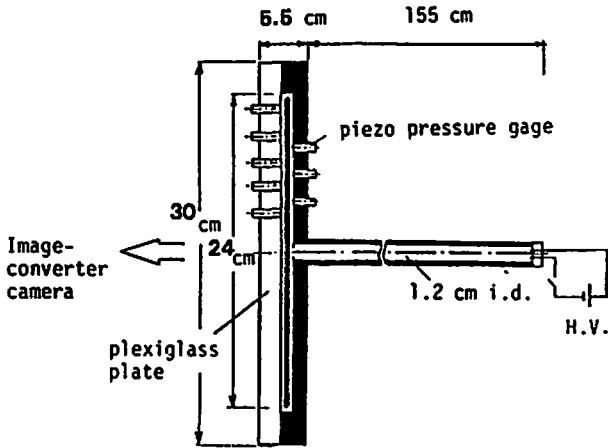


Fig. 1 A schematic of experimental apparatus for producing imploding detonation.

酸素混合気(モル比=2/3)の3種類であるが、この中で広い初期圧力にわたって安定した収束爆轟伝播特性を示したアセチレン-酸素混合気のみに限ってその伝播特性に関する系統的な検討を行った。収束爆轟の伝播速度は3種類の方法により測定を行った。1つはFig. 1に示されるように2cm間隔で設置された6個のピエゾ圧力計出力の時間間隔を測定する方法である。(Fig. 1に於ては中心対称軸上に設置された圧力計を省いてある)他の2つの測定の一つは、上記ピエゾ圧力計をオプティカルファイバー(有効径約100 μ m)で置きかえ波面における発光を一個の光電子像管受光面上に集光してパルスの時間間隔を計測する方法であり、

もう一つはイメージコンバータカメラ(Hadrand Photonics Ltd社製Imacon790型)を用いて収束爆轟の発光波面を高速でこま撮りまたは流し写真撮影を行う方法である。後者2方法による測定に於ては発光の観測に支障が無いように全面透明なアクリル板(厚さ2cm)を円筒容器壁として使用した。一方、収束爆轟の開始時の挙動、3次元セル構造等に関しては発光の静止開放写真撮影を行うことにより観測した。このような写真をFig. 2に例として示す。Fig. 2-aに示される例はいったん爆轟が停止し、衝撃波がある程度中心に向かって進行した後円筒状に再起爆した場合、Fig. 2-bはより低圧の場合に観測される例で、再起爆した収束爆轟はも早円筒対称性を失っている場合である。初期圧力は、18~200torrにわたって実験を行った。

3. 実験結果

3.1 円筒対称爆轟の起爆過程

Fig. 2の例で示されるように収束爆轟が円筒対称性を保って起爆される場合と著しく対称性を失っている場合がある。両者は初期圧 P_0 の差異により再現性良く区別される。即ち、 $C_2H_2+1.5O_2$ 試料の場合 $P_0 \geq 54$ torr の領域ではFig. 2-aに示されるように対称性の優れた円筒状爆轟を発生させることができるがそれ以下の圧力ではFig. 2-bのような崩れた波形となる。また同図からも示唆されるように爆轟の再転移位置も明白な初期圧依存性を持つ。円筒状爆轟の再起爆がしきり板端より中心に向けての距離 d_i (mm)で行われるとするとFig. 3に示されるように d_i と P_0 の間に近似的に直線関係が成立するようになると思われる。同図に示される直線を $d_i=0$ へ外挿すると $P_0 \sim 150$ torrとなる。この P_0 の値がしきり板をまわり込む爆轟が中断する事

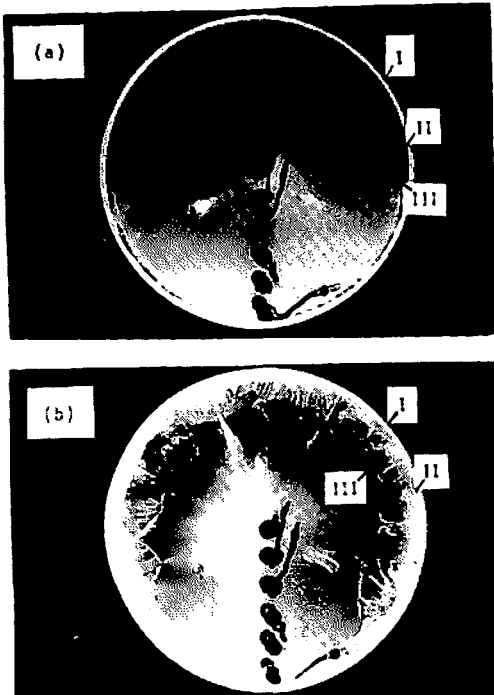


Fig. 2 Examples of open-shutter record on imploding detonation.

- (a): axysymmetrical initiation of imploding detonation ($P_0=54$ torr, $C_2H_2+1.5 O_2$).
- (b): unaxysymmetrical initiation of imploding detonation ($P_0=52$ torr, $C_2H_2+1.5 O_2$).
- I: the inner wall of the cylindrical test section
- II: the outer edge of the inserted plate
- III: the trace of the initiation of the impllosion.

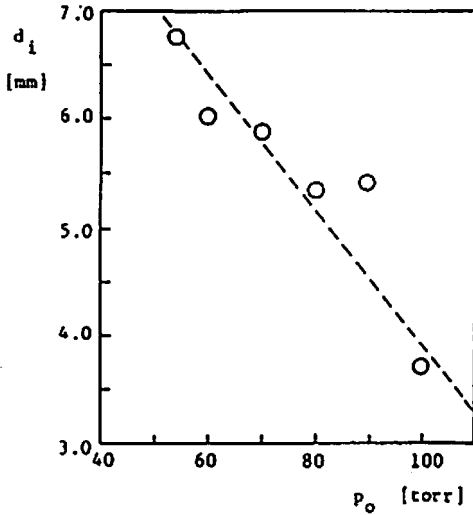


Fig. 3 The experimental results on the induction distance of the cylindrical imploding detonation against the initial pressure, P_0 ($C_2H_2 + 1.5 O_2$).

無く収束爆轟に移行する限界圧力に対応する。一方、ピエゾ圧力計、オプティカルファイバを用いて爆轟伝播速度を計測した結果をFig. 4に示す。この測定は間隔2cmで設置されている各センサ間の平均速度を表わし局所的な真の伝播速度の変化を知るには必ずしも十分ではないが明らかに起爆直後では過大爆轟となり収

束するに従ってC-J値に漸近して行くことが観測された。またFig. 2-aに示されるように円筒対称収束爆轟が開始すると規則正しい網目模様が開放写真上に記録される。中心部では後述するように反射衝撃波による非常に強い発光が重なるためこの網目の様子を詳細に観察することはできないが爆轟が収束するに従って網目を構成する発光帯筋は互に集合をくり返し、その本数が次第に減少する。このため、衝撃波面の表面積は減少し続けるにもかかわらず網目の寸法は場所によらず大体一定の大きさを保つことが判明した。この網目構造は爆轟特有の3次元構造に基づくもので特に強く発光する3重点の軌跡を表わすものと考えられる。3次元セル構造については1次元爆轟の場合詳細な研究が行われている^{9)~12)}。この網目状セル構造の爆轟伝播方向の寸法 a は反応帯長 Δ に対して経験的に次式で近似されることが判明している¹²⁾。

$$a \approx 29\Delta \quad (1)$$

この比例式の係数に関する物理化学的根拠は明かではないが多くの予混合気系に対して精度2倍程度で適用できることが確認されている。本研究で観測された収束爆轟に於ける a の値を1次元爆轟のそれと比較することは興味深い。 a に関する本実験結果をFig. 5に示す。 $P_0 = 54 \sim 80$ torrの時、 $a = 0.2 \sim 0.3$ cm程度である。これに対して(1)式に従って1次元爆轟の場合の a の値を評価すると $P_0 = 76$ torrで $a = 0.36$ cmとなり両

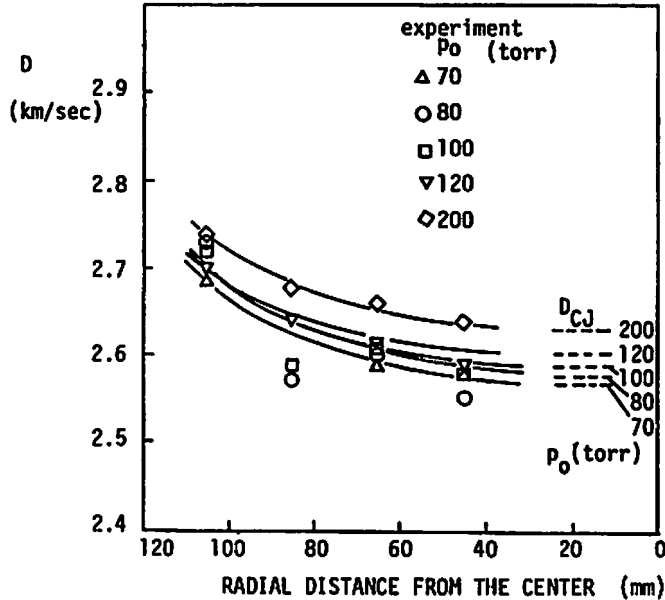


Fig. 4 The variation of the detonation velocity of the implosion against the radial distance from the center of the symmetry. [$C_2H_2 + 1.5 O_2$, the dashed curve represents the calculated detonation velocity by the one-dimensional C-J theory for each p_0].

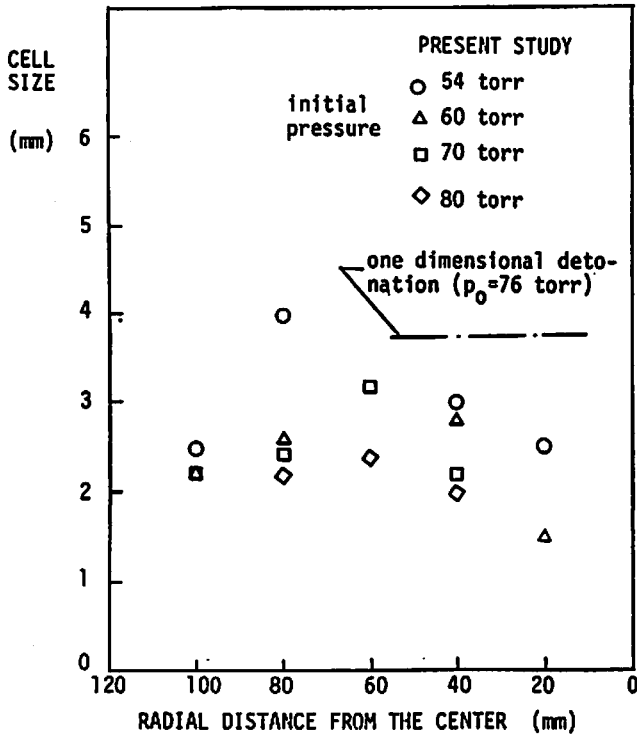


Fig. 5 The variation of the cell size against the radial distance from the center of the symmetry. C_2H_2 the dash-dot line denotes the cell size for the one-dimensional detonation at $p_0=76$ torr evaluated by use of Eq. (1) in the text).

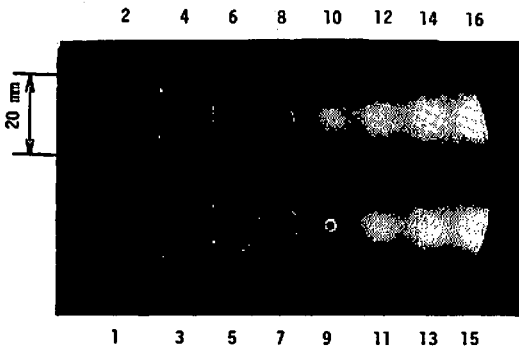


Fig. 6 An example of the image converter camera record showing the luminous cylindrical shock front of the imploding detonation and the reflected shock wave produced after the confinement. [frame intervals : $0.5\mu\text{sec}$, $C_2H_2+1.5 O_2$, $p_0=150$ torr]

者は大体互いに一致していると結論して良いであろう。

3.2 収束爆轟の中心近傍に於る特性について

まず静止開放写真により収束爆轟が集中するため発生する強い発光の状態を観測した。 P_0 を70~200torr

の範囲で変えて測定した結果、 $P_0 < 120$ torrでは焦点位置が円筒容器の対称軸と多少ずれることが見出された。このずれは低圧になるほど大きくなり $P_0 = 70$ torrでは約10mm程度になる。 P_0 が120torrを超えると収束点と対称中心のずれは1mm以内となりこれを識別できなくなる。この結果を参考としてイメージコンバータカメラによる撮影を行った。こま撮りの場合、Framing速度は $2 \times 10^6, 2 \times 10^7$ (frames/sec)の2種類を選んだ。開放時間はそれぞれ $0.1\mu\text{sec}$, $0.01\mu\text{sec}$ である。また流し写真撮影を行う場合には円筒容器壁の亚克力板に巾1mm全長24cmのスリットを有する遮光板を取付けた。流し速度は $1 \sim 20$ mm/ μs であった。中心部に於る爆轟の伝播速度を精度良く求めるため接写光学系を用いイメージ管上の倍率を $0.1 \sim 2/3$ の範囲で撮影を行った。撮影された像は拡大して解析することにより最大の解像度0.1mm程度が実現された。イメージコンバータカメラのトリガーパルスとして円筒容器上流側に設置されているピエゾ圧計の出力を適当に遅延させたものを使用した。 $0.5\mu\text{sec}$ 間隔でこま撮りされた収束爆轟の自発光写真をFig. 6に示す。写真に添付されている番

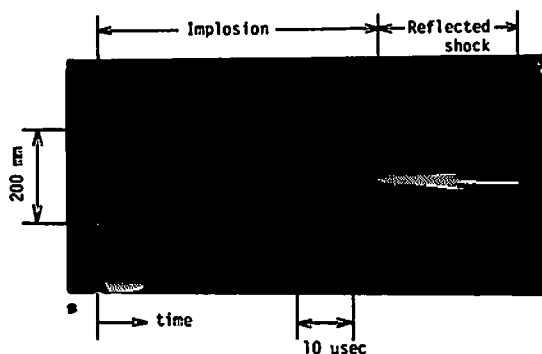


Fig. 7 The streak record of the imploding detonation and the reflected shock wave obtained by the image converter camera. [the experimental condition is the same as shown in Fig. 6].

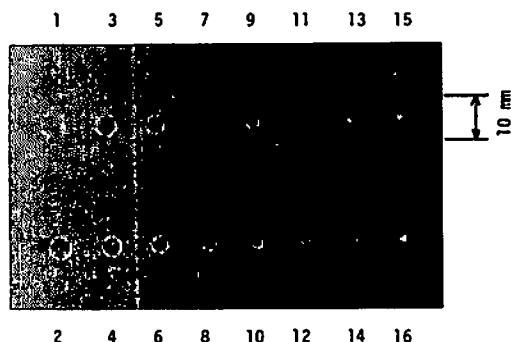


Fig. 8 The record of the image-converter camera showing the behaviour of the imploding detonation near the center of the confinement. [frame intervals : 50nsec, the experimental condition is the same as shown in Fig. 6]

号はこま撮りの順番を示し、1~9番が収束爆轟、10~16番が収束した後の反射衝撃波である。収束爆轟は中心近傍でも良い円筒対称性を保っていること、反射衝撃波は非常に強い発光を伴うことが示されているがこの程度の撮影速度では伝播速度に関する詳細な検討はできない。なお、15、16番の像はイメージ管から一部はみ出しているため円筒対称性を欠いているように見える。この写真では明かではないが撮影倍率およびこま撮り速度を色々変えて広い範囲で写真撮影を行った結果、収束爆轟の伝播速度は中心付近に収束する直前まで大体均一の値を保つこと(C-J伝播速度とほぼ等しい)、反射衝撃波はやはり優れた円筒対称性を保ちながら伝播し、次第に減衰すること、反射衝撃

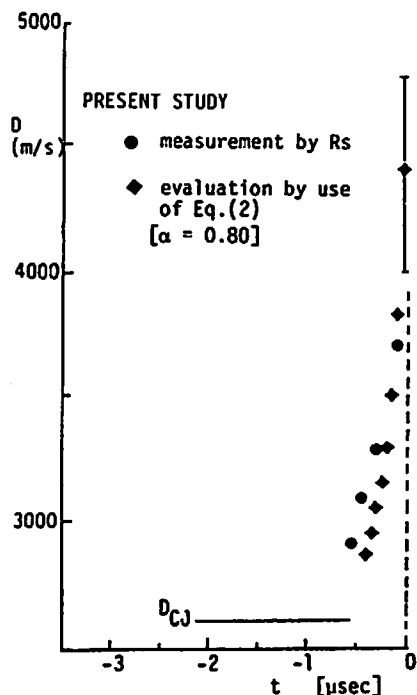


Fig. 9 The behaviour of the overdriven imploding detonation at the center of the symmetry. [● : the experimental result of the detonation velocity evaluated by the variation of R_s , ◆ : the detonation velocity estimated by using Eq. (2), where α is taken as 0.80 (see text). The error bar attached to the data point indicates the limit of uncertainty due to the error of $C_2H_2 + 1.5 O_2$, $P_0 = 150$ torr].

波背後の発光はこの減衰に伴い急速にその強度が低下するが対称中心付近にのみ非常に明るい発光を伴う核が長寿命(20μsec以上)存在すること等が認められた。同様の結論はFig. 7に一例を示す流し写真からも得られる。なお本研究に於いて用いたスリット巾(1mm)は中心部の収束爆轟の挙動を詳細に検討するには広すぎるため速度の解析はこま撮り写真を基にして行った。Fig. 8に50nsec間隔で撮影された写真例を示す。同図では半径0.2mm程度まで収束した爆轟波が記録され(写真15番)次のこまでは、更に半径が小さくなった反射波が記録されている。これから判定して本装置による収束爆轟波は少なくとも、半径0.2mm程度までの収束性はあるものと判定される。収束爆轟のこま撮り写真からその半径 R_s の時刻 t に対する変化を読み取り爆轟伝播速度 D を求めた結果をFig. 9に示す。中心付近に於てC-J爆轟から過大爆轟へ急激に移行して

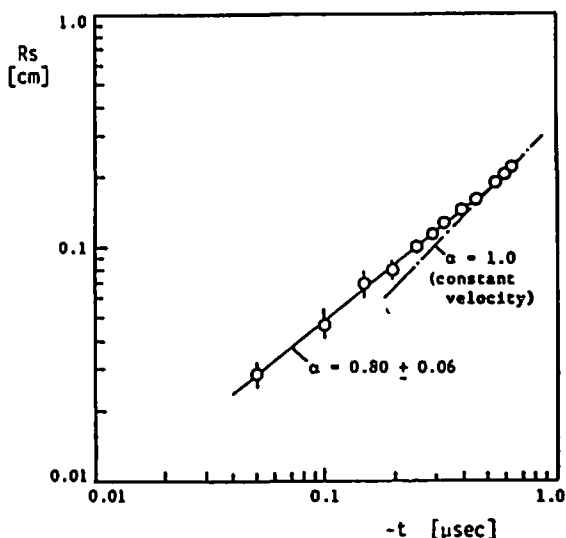


Fig. 10 The correlation of logarithm of radius of the imploding detonation to the logarithm of the absolute value of time. [$C_2H_2 + 1.5 O_2$, $P_0 = 150$ torr].

行く様子が示されている。なお、こま撮り写真の半径の推移から内挿により求めた爆轟波から反射衝撃波へ移行する時刻を $t=0$ とした。 $t = -1 \mu\text{sec}$ 程度に収束が進んだ時初めて明確な過大爆轟へ移行していることがわかる。

爆風理論によれば、収束爆轟は中心付近でその挙動が次式で与えられることが示されている^{13), 14)}。

$$R_s = c|t|^\alpha \quad (2)$$

ここで、 c, α は定数である。(2)式が爆風理論として往々用いられる自己相似解の条件を満たすのは、

$$D^2 >> 2Q \quad (3)$$

(Q : 化学反応熱) が満たされる時だけであり、本実験に於いて観測された中心部での過大爆轟は(3)の条件を満たすまでには加速されていない。 $\log |t|^\alpha$ と $\log R_s$ の関係は Fig. 10 に示されるように良い直線関係で与えられるように見える。同図から(2)式に含まれる定数 α は $P_0 = 150$ torr の時、

$$\alpha = 0.80 \pm 0.06$$

と決定された。この値は Ahlborn and Huni²⁾ の $H_2, C_2H_6, C_3H_8 + O_2$ 系に於ける測定値とほぼ一致している。

4. 結 論

収束爆轟は有限長の反応帯を考慮する時 C-J 理論を適用できない¹⁵⁾。それにも関わらず中心の極めて近傍までその伝播速度が C-J 理論で予測される値と大体一致していることが確認された。この事は反応帯長 Δ が R_s に比べて極めて小さい事を意味している。 C_2H_2

+ $1.5O_2$ 試料に対して $P_0 = 0.1$ 気圧では $\Delta \approx 0.1$ mm 程度と評価される¹²⁾。従って中心付近の過大爆轟に移行するまでその伝播速度が近似的に C-J 理論で与えられることは妥当である。本実験に於て用いられた簡単な装置でも収束半径 0.2 mm 程度の優れた収束性を有する爆轟波を作り出すことができる事を確認した。従って反射波背後では高温のプラズマが生成されているものと推定される。その温度は収束性によって支配されるため中心付近の収束爆轟の挙動を更に詳細に検討する必要があるが使用したイメージコンバータカメラの時間ユニットおよびフィルム感度に限界があるためこれ以上の高速撮影は実施できなかった。今後別の手法、例えば分光法による温度測定等を行うことによりその収束性に関する検討と改良を加える事が期待される。

謝 辞

本研究の一部は第 17 回火薬工業技術奨励会およびセコム科学技術振興財団の研究助成の下に実施された。また、イメージコンバータカメラの使用にあたり多くの有意義な助言と指導を戴いた東京大学工学部総合試験所、津野隆夫助手と中村英雄技官および種々の御助言を戴いた通産省化学技術研究所、田中克己博士に御礼申し上げます。

文 献

- 1) J. H. Lee and B. H. K. Lee, Phys. of Fluids, 8, 2148 (1965), *ibid.*, 9, 221 (1966)
- 2) R. Knystatus and J. H. Lee, AIAA J. 5, 1209 (1967)
- 3) A. Ahlborn and J. P. Huni, AIAA J. 7, 1191 (1969)
- 4) 藤原俊隆, 滝 央郎, 日本航空宇宙学会誌, 20 巻 411 (1972)
- 5) W. Chester, Philosophical Magazine, 45, 1293 (1954)
- 6) R. F. Chisnell, J. Fluid Mech., 2, 286 (1957)
- 7) G. B. Whitham, J. Fluid Mech., 4, 337 (1958)
- 8) B. H. K. Lee, AIAA J. 5, 1997 (1967)
- 9) D. C. Bull, J. E. Elsworth, P. J. Schuff, and E. Metcalfe, Comb. and Flame, 45, 7 (1982)
- 10) R. A. Strehlow and D. C. Engel, AIAA J. 7, 492 (1969)
- 11) R. A. Strehlow and P. M. Rubins, AIAA J. 7, 1335 (1969)
- 12) C. K. Westbrook, Chemical Kinetic Factors in Gaseous Detonation, in The Chemistry of Combustion Processes, ed. by T. M. Sloane, ACS

- (1984) pp175-192.
- 13) G. Guderley, Luftfahrtforsch. Band, 19, 302 (1942)
- 14) R. L. Welsh, J. Fluid Mech., 29, 61 (1967)
- 15) R. Courant and K. O. Friedrichs, Supersonic Flow and Shock Waves, Interscience Publishers Inc., New York (1948)

STUDIES ON THE CYLINDRICAL IMPLoding DETONATION
IN A MIXTURE OF ACETYLENE AND OXYGEN

Yoshiro NAGUMO*, Joji KOGA*, Hiroyuki MATSUI*
Kuniaki YONEDA* and Mitsuo KOSHI*

The initiation, the propagation, and the confinement behaviours of the cylindrical imploding detonation of acetylene and oxygen mixtures have been studied at the various initial pressures. The imploding detonation with an excellent cylindrical symmetry can be initiated above the initial pressure of 54 torr for the mixture of $(C_2H_2)/(O_2)=2/3$. The induction distance for the initiation of the cylindrical explosion, the variation of the detonation velocity, and the size of the cell structures have been measured. The behaviour of the imploding detonation at the center of the axial symmetry could be precisely observed by using a high-speed image converter camera. It is confirmed that the detonation behaviour at the highly overdriven condition near the center of the confinement can be well described by a simple blast wave theory.

(*Department of Reaction Chemistry, Faculty of Engineering,
The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113)

ニュース



デュボン、火薬より撤退

デュボンは高収益性に照準を合わせた新多角化戦略を打ち出した。伝統的な火薬部門を売却し耐熱性の高いセラミック金属合成素材に進出するため新素材会社に資本参加する。すなわち米国内の商業火薬部門とデュボンカナダの火薬部門をカナダのCICカナディアン・インベストメント・キャピタルに売却する。売却金額は明らかにされていないが、事実

上デュボンの同部門からの撤退ともいえる。新たに資本参加するのはデラウェア州にあるランキサイドで筆頭株主として事実上傘下に置く。今回の資本参加によりランキサイドはセラミック繊維やカーボンファイバーなどデュボンの持つ技術の実用化製品化にも力を入れる。

(62年9月10日 日経産業新聞)(木村 真)