論 文

CONTRIBUTED PAPERS

収束するデトネーションの安定性と円筒対称性*

——膨張デトネーションによる収束デトネーションの発生——

Stability and Cylindrical Symmetry of Converging Detonation

—Initiation of Converging Detonation Using Diverging Detonation

杉 村 忠 良**

Tadayoshi SUGIMURA

Abstract

Oxyacetylene converging detonations are produced using a disk-type vessel of 80 cm i.d. which consists of a converging and a diverging sections divided by a diffraction disk. The diverging section is preceded by a pre-run tube.

Effects of pre-run tubes on the stability of convergence of detonations are examined. It is found that at initial pressures below 150 Torr, pre-run tubes are necessary in order to obtain stable cylindrical converging detonations.

Utilizing a preliminary experimental apparatus with two-dimensional curved channels, the features of diffraction of detonations are observed by means of open-shutter and schlieren photographs. Recovery to the planarity of detonation front after passing through the curved path is found to take relatively long time.

The propagation velocity measurement of detonation in the converging section shows that with decreasing radius of the converging wave, it behaves as the cylindrical converging shock wave of the similarity exponent $n=0.85$.

The average pressure measured in the vicinity of the collapsing center of detonation is about 53 kg/cm² which nearly equals to 16 times the calculated pressure value of the C-J detonation under identical initial conditions, i.e., the initial pressure 60 Torr and the equimolar oxyacetylene gas mixture. This is close to the value 18 measured by LEE *et al.* at the initial pressure 190 Torr, using the same mixture.

束部のコーナーの効果、隔膜・初期圧・点火側混合気の影響やその温度に対する影響などが明らかにされた。これとは少し異なったタイプの装置で高温の発生やパルスレーザーへの利用を目的とした研究が、1965年ごろから LEE ら⁵⁾や AHLBORN ら⁶⁾によって行なわれている。LEE らは等モルアセチレン酸素混合気を初期圧 150 Torr 以上、AHLBORN らは化学量論エタン酸素混合気を 450 Torr で用いたのに対し、PERRY-KANTROWITZ 型を用いた藤原ら¹⁾はそれよりもずっと低い 10 Torr 程度でも等モルアセチレン酸素混合気の安定な対称収束デトネーションを実現している。LEE らや藤原らのように同じ混合気を用いても幾何学的形状により安定な対称収束デトネーションを得る限界初期圧がかなり異なっている。収束中心に得られる最高温度と最高圧力、それに付随した分子内部自由度の反転分布の可能性と維持時間などは実現されるデトネーションの円筒対称性に直接関係するから、広い初期圧範囲にわたって円筒対称性を実現する装置が必要である。本実験では、LEE ら⁵⁾が最初に用いたディスク型と同型で寸法が大きい装置を用いて、150 Torr よりも低い初期圧のもとで、安定で円筒対称な等モルアセチレン酸素収束デトネーションをうるべき実験条件が調べられ、収束過程におけるデトネーションの速度測定と収束中心近傍での圧力測定が行なわれた。

2. 実験装置

第1図に用いられた実験装置のあらましが示される。実験に先だち、真空ポンプによって約 0.2 Torr まで真空に引かれた装置内に、ミキシングタンク内で 30 分以上攪拌された試験気体（アセチレン酸素混合気）が導入される。所望の初期圧力はダイヤフラム真空計によって設定される。自動車用点火プラグの放電（10 kV, 0.2 μ F）によって作られたデトネーション

1. 緒 言

筆者らのグループ^{1)~4)}は、PERRY-KANTROWITZ 型の装置を用い、円筒収束する酸素素およびアセチレン酸素デトネーションの安定性と温度を調べた。管端収

* 昭和52年12月6日、第15回燃焼シンポジウムにて発表。昭和53年4月5日原稿受理

** 名城大学理工学部

第1図 実験装置概略図

(a) 実験装置と測定系

(b) デトネーション発生容器詳細図

は、鉛直上方に長さ100~450 mm、内径10~27.6 mmの動走管内を伝播し、直径800 mmのディスク型容器内に入る。ディスク型容器内の空間は、回折円板によって上部ディスクと下部ディスクに区分され、それらはそれぞれ拡大部と収束部になる。直径777.4 mmで厚み38.9 mmの回折円板は、8本の二重くさび形状をしたボルトで拡大部の下壁に固定されている。

デトネーション波面は、一様厚み12.9 mmの拡大ディスク内を中心から半径の増大する方向へと伝播し、拡大部から収束部へかけての環状経路において進行方向を徐々に変え、収束部入口において、伝播方向の逆転をほぼ終える。環状経路は、なめらかな曲線で形成されている：すなわち、半径約400 mmから122 mmの区間で収束部の厚みは10 mmから3 mmへとゆるやかなテーパーをもち、半径122 mm以内は一様で3 mmである。収束部には、最大有効径160 mm、厚み28 mmの光学測定用石英ガラスが取り付け可能な観測窓が設けられている。さらに収束部上壁には、デトネーション波の到達を感知する圧力端子孔が同一半径上（中心より190, 260, 330 mm）に3カ所設けられており、必要に応じて観測窓ガラスの代りに、圧力端子孔（中心および中心より30, 60 mm）のついた鉄板をはめこむことができ、収束点近傍におけるデトネーション伝播速度の変化を測定できるようになっている。実験に用いられた気体は、市販のアセチレン（竹中高压・純度99.8%）と酸素（日本酸素・純度99.99

%)であった。

3. 曲がった二次元チャンネル内のデトネーション（環状経路形状の影響）

LEEら⁵⁾は、安定な対称収束デトネーションを得る際に、その初期圧の下限を150 Torr以下に下げられなかった最終的な原因として、回折円板外周と円筒容器の内壁周辺部とから形成される環状経路の幾何学的形状を挙げている。藤原ら¹⁾も、PERRY-KANTROWITZ型収束デトネーション装置を用いた実験において、コーナーの形状は安定な収束デトネーションに対して重要なパラメータであることを指摘し、コーナー形状を整形した結果、等モルアセチレン酸素混合気で14 Torrという低い初期圧で安定した収束デトネーションを得た。さらにKNYSTAUTASら⁷⁾は、コーナーでの回折効果を最小にするために収束部に入る手前でいったん流路を絞り、回折を終えたところで再び流路をひろげるという方法により、初期圧25 Torrからデトネーションの対称性を得ている。

本研究では、このように曲がった経路内でのデトネーション伝播を調べるために、二次元のいくつかの異なるチャンネルを作り、そのなかのデトネーションの挙動を調べた。第2図は用いられたチャンネル形状と観測に使用された撮影システムを示す。最初に、デトネーションの発光が開放写真上に記録された（第3図）。(a)は幅20 mmの直角に折れ曲がったチャン

第2図 2次元チャンネル形状と補助実験装置

第3図 各種チャンネル内における開放写真

- (a) 直角に折れ曲がったチャンネルの場合. $C_2H_2 + O_2$, 初期圧 30 Torr
 (b) (a)と同じチャンネル. $C_2H_2 + O_2$, 初期圧 60 Torr
 (c) 一定断面積同心半円形チャンネルの場合. $C_2H_2 + O_2$, 初期圧 60 Torr
 (d) 偏心半円形チャンネルの場合. $C_2H_2 + O_2$, 初期圧 60 Torr

ネル内に初期圧 30 Torr で等モルアセチレン酸素がつめられたときのデトネーションの発光を示す。観測される細かな網目模様は、デトネーションに含まれる衝撃波三重点の発光軌跡である。これを見ると入射して直角に曲げられるまでデトネーションは定常に進行するが、角を通過するとき、三重点の様子を著しく変え、quenching に近い状態になる。

初期圧が 60 Torr と高い (b) の場合、発光の網目模様は、より細かになり、一次元伝播するデトネーションは、より規則正しいが、角をまわるとに網目模様には大きな乱れが見られるのは (a) と共通である。デトネーションの前面衝撃波が角を通過した後、内壁コーナーから出るプラントル・マイヤー膨張の結果、衝撃波後方の気体は冷却され、反応誘起時間が長くなるため三重点による高温も発熱反応を従わずには十分でなく、三重点は弱まる一方となり、その軌跡はコーナーを曲がった後、内壁付近 (プラントル・マイヤー膨張が強い) で消滅し、外壁付近で弱まる。

一次元デトネーションが拡大された空間に伝播するときの回折効果と出口形状の關係に関して、KNYSTAUTAS⁹⁾ らが得た開放写真と類似している。角を曲がってチャンネル幅程度の距離だけ伝播したところで、再びデトネーションは再形成され以前の伝播に戻る。写真 (a), (b) から判断すると、この再形成に寄与しているのは外側の壁に近い三重点である。かなり弱まっているが、まだ反応を誘起するに十分な強度をもつ三重点がいくつか (3~4 個) 残っていて、プラントル・マイヤー膨張が終わると再び活発に反応熱を三重点同士の衝突とそれに基づくデトネーション伝播に補給しはじめるというわけである。30~60 Torr 程度の低圧では、等モルアセチレン酸素はデトネーション波面内に 10 個以上もの三重点を含んでいるため、そのなかのいくつかが再形成の核になる。ところがもっと低圧になると、定常伝播での三重点が 2~3 個になり、角を曲がるとき全部が消滅してしまうことが多い。このため角を曲がった後デトネーションが再形成されないことが起こる。三重点同士の衝突とプラントル・マイヤー膨張が干渉し合うコーナーでの問題は、複雑であるためここでは解析しないが、ショック・ポラーを連続して用いることにより近似的に可能で、今後の課題である。

第3図 (c), (d) は、それぞれ同心円弧と偏心円弧でコーナーが成形された場合の発光写真である (内側の円弧半径 27.5 mm, 外側は 47.5 mm で、(d) の場合には 10 mm だけ偏心させたものである)。一樣断面の (c) の場合、内側の円弧に沿った領域ではプラントル・マイヤー膨張による網目模様のふぞろいが明瞭に

観測されるのに対し、(d) ではきわめて弱い。しかし、(c) においてもデトネーションが平行部に入るにつれて、再び規則正しい網目模様に回復していくのが見られる。

(c) と (d) の差の原因は、流路に沿った断面積変化である。内壁上でのプラントル・マイヤー膨張効果が外壁からの圧縮により相殺され、むしろ全体には圧縮効果のほうが強くなっているのが (d) で、(c) は内壁付近で膨張による三重点消滅の傾向を消し去っていない。したがってコーナーを回った後、チャンネル幅の数倍後にもなお、はじめのような規則正しい対称性を回復していない。

それゆえ、低圧で安定なデトネーションを得るためには、KNYSTAUTAS⁹⁾ ら⁷⁾、藤原¹⁾、HUNI⁹⁾ によって指摘されたように、回折効果を最小にするために流路を滑らかにしぼるか、収束部自体の径を滑らかに拡大することが望ましいと考えられる。

発光写真を観測した第3図 (b), (d) の場合の瞬間シュリーレン写真による観測結果が第4図 (a), (b) に示される。初期圧 60 Torr の等モルアセチレン酸素中のデトネーション波面の瞬間シュリーレン写真が、発光時間 2 μ sec の Mg ランプによってとられ、第4図はこれを合成したものである。デトネーション速度は約 3,000 m/sec であるから、2 μ sec の間には約 6 mm 進むので、波の微細な構造を知るうえには、より短い持続時間を必要とするが、それでもデトネーションのコーナー付近の挙動について、次のような事実が明らかにされた。

(i) コーナー以前のデトネーションはきわめて平面で、そのなかに数多くの独立した輝点 (三重点) を含む。

(ii) デトネーションのシュリーレン像は前面よりも背面のほうがより明瞭な不連続性をもつ。前面の強い密度の不規則性は、三重点によると考えてもよいが、いまのところ不明である。

(iii) (a) で、コーナーを曲がるにつれて、デトネーションの内壁側部分は曲がると同時に膨張による急冷のため消滅してゆく。曲がった後、チャンネル幅の長さ程度でデトネーションはほぼ再形成されたといえるが、その平面性は失われたまま、(a), (b) の両図の範囲では最後まで波面は曲がったままである。

(iv) (b) のしぼられた偏心円形チャンネルでは、デトネーションは消滅なしにうまく回折を行なうが、平面性の回復は (a) と同様に遅い。

(v) (a), (b) とともに回折直後デトネーションはかなり減速されており、それゆえ波面に含まれる三重点の数が少なくなっている。

第4図 合成された瞬間シュリーレン写真
(a) 直角に折れ曲がったチャンネルの場合
(b) 偏心半円形チャンネルの場合
いずれも $C_2H_2 + O_2$, 初期圧 60 Torr
シュリーレン光源: Mg (発光時間 2 μ sec)

以上の補助実験結果より、一様断面のままより、デトネーションの通路を収束したほうが角を曲がったときに生ずる擾乱をより速やかに消すことが判明した。この事実に基づいて、本実験に使用された第1図(b)の拡大部から収束部への移行は第3図の(c)と(d)の中間に対応する対数螺旋的な収束によって行なわれた。

なお本補助実験から次のことが示唆される: 第4図(a)のように直角コーナーで曲げられた高温ガスは、非平衡内部エネルギー分布をもつ可能性が大きいので、コーナー部は分子、原子、ラジカルの非平衡緩和やエネルギーやりとりの研究に用いうる。

4. 助走管の効果

本実験で最初は助走管を使用せず、拡大部の下壁と回折板とにそれぞれ電極をとりつけ、その間で火花をとばす方法をとったが、等モルアセチレン酸素混合気初期圧 100 Torr 以内では安定に収束するデトネーションが得られなかった。すなわち、安定な収束に対しては、140 Torr 以上の初期圧を必要とした。このことは LEE ら⁶⁾が、同型式の装置で安定収束をうるのに初期圧 150 Torr を要するという結果に対応する。初期圧 26~29 Torr で直接点火したとき、第5図にみられるようなスス膜写真が得られた。収束中心が約 2 mm 幾何学的中心からずれているほかに、明らかに回折板を支持するために拡大部にとりつけられている8本の二重さびボルトの影響がでている。30 Torr 以上で直接点火するとスス膜写真において幾何学的中心部まわりに、衝撃波三重点の軌跡を示す対数螺旋曲線を、途中で断ち切ったような八角形領域があらわれるが、開放写真上では必ずしも顕著でない。これらの

第5図 収束部のスス膜写真
 $C_2H_2 + O_2$, 初期圧 29 Torr, 助走管なし

成因は文献 4) に説明されているので、ここではたし入らない。

第6図は用いられたいくつかの助走管を示す。内径 12.5 mm, 長さ約 70 mm の円管で本体とは内径 5 mm, 長さ約 15 mm の孔で接続された助走管 No. 1 では、約 60 Torr 以上で安定な収束現象が現われた。第7図は初期圧 60 Torr の等モルアセチレン酸素の収束点付近の開放写真である。低圧での収束デトネーションの通過により残される対数螺旋模様はもはや見られず、約 50 mm の領域に放射線状の強い発光がみえる。しかしながら、外周部分をよく調らべてみると細かい規則的な対数螺旋模様を確認することができた。さらに同じ条件のもとで得られたスス膜模様においても、強い放射状の発光部分の軌跡に対応する痕跡の中に、うすいけれども非常に細かい対数螺旋状網目模様が確認された。一般に円筒収束デトネーションにおいては、一点 (2 mm 以内の小領域) へ収束するか、その収束点が幾何学的中心に一致するかの二つの問題が存在するが、助走管 No. 1 を用いることによりデト

第6図 用いられた助走管の種類

第7図 助走管 No. 1 を用いたときの収束点開放写真
 $C_2H_2 + O_2$, 初期圧 60 Torr 第8図 助走管 No. 2 を用いたときのスス膜写真
 $C_2H_2 + 2O_2$, 初期圧 32.3 Torr

ネーションの一点収束を作りだす部分は改良されたが、初期圧 90 Torr においてさえも 80% 程度の確率でしか安定に一点収束するデトネーションを得ることはできなかった。そのうえ $C_2H_2 : O_2 = 1 : 3$ では、初期圧 100 Torr においても一点への収束がまったく得られなかった。結局、この助走管の有効使用範囲は初期圧、混合気に対し十分広くないので、満足のいく助走管でないことが明らかとなった。

助走管 No. 2 によって、等モル混合気では初期圧 40 Torr 付近から一点収束がみられ、70 Torr 以上では中心での一点収束が得られた。 $C_2H_2 : O_2 = 1 : 2$ においても約 30 Torr から一点収束がおこりうるが、この化学組成では 70 Torr 以上でないと中心での一点収束デトネーションが生じないことがスス膜写真や開放写真から判明した。第8図は、 $C_2H_2 : O_2 = 1 : 2$, 初

期圧 32.3 Torr で得られたスス膜写真である。この初期圧では第7図でみられた放射状スス模様は見られず規則正しい螺旋模様のみが残されている。以上の実験からいえることは、このように低い初期圧のもとでは、この螺旋模様も鮮明であるが、初期圧が高くなると放射状の痕跡が著しくなり、螺旋模様はかき消された状態になることである。第7図に示されるように、等モルアセチレン酸素デトネーションの収束周辺部では、まだいくらかの螺旋状網目模様が確認されるが中心部では放射状の痕跡のみが存在するという事実は、強力で一次的な波面構造に近い収束デトネーションの生成を物語る。

助走管の内径を 10 mm と小さくし、長さを 45 cm と少し長くした助走管 No. 3 では、等モル混合気中に一点収束する初期圧の下限をさらにさげることがで

き, 60 Torr から中心への一点収束を得ることができた. 中心への一点収束の再現性をみるために, 等モルアセチレン酸素混合気初期圧 60~100 Torr についてス膜模様法を用いて収束点の位置を測定した結果, No. 3 の助走管では中心から半径 2 mm の円内に 95% 以上が収束した. 初期圧 60 Torr から 70 Torr では, 中心から半径 1 mm の円内に 85% 以上が収束した. ここで, 光学測定に際しては, 窓ガラスの破損をさけるために初期圧 60 Torr が選ばれたことを記しておく.

5. 速度測定

収束中心付近ではデトネーションは著しく過剰圧縮状態になり, 相似解によって記述される強い衝撃波のように振舞うことが知られている. 収束中心から衝撃波面までの位置 r は, 時間の原点 $t=0$ を崩壊の瞬間にとると, $r \propto (-t)^n$ で表わされる. 相似指数 n は各時刻でのデトネーション位置, すなわち $\log(-t)$ に対し $\log r$ をプロットすれば, その勾配から実験的に決定される. 本実験では, 収束部の幾何学的中心および中心から 30, 60, 190, 260, 330 mm の計 6 個所に圧電素子 (3 mm ϕ) あるいはシリコン・フォトセル (HTV-S 641) がとりつけられ, デトネーションの伝播速度計測が行われた. 第 9, 10 図はその結果を示し, 図中の各点は 5~10 回の実験値の平均値である. 速度測定の精度であるが, 5~10 回の同じ実験のばらつきは各○印の中に入ってしまうくらいにより再現性を示す. これは一つには直径約 80 cm というかなり大型の装置を用いたことによる. 相似指数 n を求めるのに圧力を測る方法もあるが, 圧力変換器の立上り感度, 高温の校正, 収束性のばらつきなどの要素を考慮して, 本実験は速度測定によった.

第 9 図の相似指数の値をみると, 半径の大きなところでは, $n=1$ でデトネーションは一定速度の平面波のような挙動を示すが, $r < 260$ mm では, 実験点はほぼ一直線上にのり, その傾きから $n=0.85$ がえられる. GUDERLEY¹⁰⁾ の理論によれば, この n は比熱比 $\gamma=1.28$ の円筒収束衝撃波に一致する. この γ は初期圧 60 Torr における等モルアセチレン酸素の平面デトネーションに対する $\gamma \approx 1.39$ ¹¹⁾ に比し小さい. これはデトネーションが収束するにつれて温度が上昇し, C_v が増加する結果であると推定される. この n の実験値は, 混合気および初期圧によっても異なるが, AHLBORN ら⁶⁾ が得た値 $n=0.87 \pm 0.06$ (2C₂H₂+7O₂, 初期圧 450 Torr) に近い.

第 10 図をみると, 260 mm $< r < 330$ mm での平均伝播速度は, 約 3,100 m/s で初期圧 60 Torr に対す

第 9 図 収束デトネーションの相似指数
C₂H₂+O₂, 初期圧 60 Torr

第 10 図 収束デトネーションの $t-r$ 線図
C₂H₂+O₂, 初期圧 60 Torr

る C-J 値よりも高い値を示すが, その後急激に伝播速度は減少し, 190 mm $< r < 260$ mm では, その平均値が 2,740 m/s と C-J 値に近い値になる. さらに中心へ伝播するにつれて速く加速され, $r < 60$ mm

第11図 収束点における圧力測定
横軸 50 μ s/div., 縦軸 28.6 kg/cm²/div.
C₂H₂+O₂, 初期圧 60 Torr

ではその傾向が著しく強くなる。収束部に入ってデトネーションは、半径の小さい方向へ伝播するにもかかわらず、 $r \approx 260$ mm あたりから伝播速度は C-J 速度に近い値へと下がる。これはそれ以前の C-J 値よりも大きな速度が再形成による overdriven detonation によるものであるため、この状態はすばやく唯一の定常状態である C-J 値へと戻るのである。図中の破線は、 $n=0.85$ としたときの r と t の関係を示す。伝播速度の減少後、再び C-J 値に達するのは $r \approx 120$ mm あたりである。

第11図は、収束中心近傍における半導体圧力変換器 (TOYODA-PMS-8 M) によって測定した一例である。受感部は 8.3 mm ϕ と大きく、立上り特性は 10 μ sec と鈍いため、観測値はこの領域内の平均的な量で、一つの目安にすぎないが初期圧 60 Torr に対し、約 53 kg/cm² という平均圧力が得られた。この値は同じ初期条件における平面デトネーションの圧力約 3.4 kg/cm² の約 16 倍であり、LEE ら⁵⁾ が初期圧 190 Torr で得た倍数値 18 に近い。

6. 結 論

大型のディスク型収束装置において助走管 No. 3 を用いた場合、初期圧 60 Torr 以上で等モルアセチレン酸素混合気のパネル収束デトネーションをうることができた。このデトネーションは収束点付近では GUDBRLEY の相似解とほぼ一致する挙動を示した。

火花点火に用いられたイグニッション・コイルの代りに、もっと精度のいい安定化高圧電源を用い、かつ助走管に隔膜をとりつけければ、より対称的に中心で一点収束するデトネーションが得られると思われる。

デトネーションが任意形状の曲がった二次元チャン

ネルを進むときに受ける擾乱とその余波および収束性におよぼす効果が補助実験装置により研究された。初期圧 60 Torr 程度では、滑らかに変化する断面によりデトネーションの伝播方向を曲げて、デトネーションが失った平面性をとり戻すには長時間かかることがシュリーレン写真による観察より明らかになった。

終わりにあたって、本実験の遂行において終始ご指導くださった名古屋大学工学部航空学科 藤原俊隆助教授に感謝する。また装置の製作でお世話になった名城大学理工学部交通機械学科 伴野秋義助手に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 藤原俊隆, 杉村忠良, 溝口謙一郎, 滝 史郎: 円筒状に収束するデトネーションの安定性, 日本航空宇宙学会誌, 第21巻, 第232号 (1973), pp. 256-262.
- 2) FUJIWARA, T., TAKI, S. and SUGIMURA, T.: A Rotational Temperature of Oxyacetylene Converging Detonation, Acta Astronautica, Vol. 1, No. 7/8 (1974), pp. 863-872.
- 3) 藤原俊隆: 収束衝撃波による高温の発生, 日本航空宇宙学会中部支部・定例談話会記事, 第39号 (1973).
- 4) SUGIMURA, T., HAYASHI, K. and FUJIWARA, T.: Rotational Temperatures of Oxyacetylene Converging Detonations (II) Measurement with OH Ultraviolet Emissions, AIAA Paper No. 76-130 (1976).
- 5) LEE, J.H. and LEE, B.H.K.: Cylindrical Imploding Shock Waves, Phys. Fluids, Vol. 8, No. 12 (1965), pp. 2148-2152.
- 6) AHLBORN, B. and HUNI, J.P.: Stability and Space-Time Measurements of Concentric Detonations, AIAA Journal, Vol. 7, No. 6 (1969), pp. 1191-1192.
- 7) KNYSTAUTAS, R. and LEE, J.H.: Experiments on the Stability of Converging Cylindrical Detonations, Combustion and Flame, Vol. 16, No. 1 (1971), pp. 61-73.
- 8) KNYSTAUTAS, R. and LEE, J.H.: Spark Initiation of Converging Detonation Waves, AIAA Journal, Vol. 5, No. 6 (1967), pp. 1209-1211.
- 9) HUNI, J.P.: A Study of Cylindrical Imploding Detonations, Ph. D. Thesis, University of British Columbia (1970).
- 10) GUDERLEY, G.: Starke kugelige und zylindrische Verdichtungsstöße in der Nähe des Kugelmittelpunktes bzw. der Zylinderachse, Luftfahrtforschung, Vol. 19 (1942), pp. 302-312.
- 11) SHANFIELD, I., LEE, J.H. and LEE, B.H.K.: Theoretical Calculation of Gaseous Detonation, McGill University Publication MERL TN 64-10 GD 22 (1964).