

爆発から発生しメタン—空気当量混合気体中を 伝播する衝撃波に関する研究（第1報）

一次元管中の衝撃波の挙動

米田 昭*，越 光男*，浅羽 哲郎*
松井 英憲**，松為 宏幸*

爆発の爆発によって生ずる衝撃波によって、着火されたメタン—空気当量混合気体が、断面積一定の管中を伝播する場合の消炎現象について研究した。

実験的観察は、火炎が消炎した時の先行衝撃波および火炎の状態を測定することによって行なわれた。結果は、先行衝撃波が600~700m/secに減衰した時に、消炎することが見出された。これに基づいて消炎過程の機構の考察を行ない、消炎は後方よりの希薄波に原因することが認められた。

1. 緒言

爆発の爆発による、メタン—空気系の混合気体の着火現象は古くから問題になっており、過去非常に多くの研究が行われている¹⁾。そして着火の原因として i) 爆発からの衝撃波、ii) 爆発の爆発生成気体および、iii) 爆発の爆発から生じた灼熱固体粒子が考えられている。しかしながらこれまでの研究は、大体実際の発破に近い実験条件で行われた研究が多く、これらの着火の要因を定量的に調べた研究は殆んどないといわれてよいであろう。本研究では、まず最も理解されていない、衝撃波の挙動を明らかにする目的をもって、実験およびそれを理解するための計算を行った。その結果を報告する。

爆発の爆発によって生ずる衝撃波が、爆発に接しているメタン—空気当量混合気体を着火させることは確実であるから、問題は生成した火炎を含み管中を一次的に進行する高温衝撃波が、どのような過程を経て、爆発室に充たされた爆発性混合気体を着火させるか、またはそのまま消炎してしまうかを調べればよいことになる。実験で示すように消炎は勿論爆発室の入口でも起るが、また一見甚だ奇妙な現象のようであるが、管中でも屢々消炎することが認められた。したがって第

1報として、まず比較的解析の簡単な一次元衝撃波中の消炎をとり扱い、三次元的で複雑な爆発室入口の消炎を第2報に述べることにする。

2. 実験および結果

2.1 流し写真による観察

爆発の爆発により生ずる衝撃波で着火し、管中を伝播する火炎が途中で消炎する典型的な例を（図1）に示した。これは内径6.5mm、長さ5mの管にメタン（9.3%）と空気の混合気体を1気圧満たし、下端に装填した0.35gの爆薬（PETN）を3300V、4 μ fのコンデンサーの放電による線爆発によって起爆し、メタン—空気混合気体を着火させ、その火炎が管中を伝播する様子を流し写真により撮影したものである。火炎は明らかに下端より約3.4mのところまで消炎している。この消炎過程をさらに詳細に観察するため、シュリーレン写真によって測定した。内径25mmの真鍮製チューブに、長さ250mm、巾5mmの光学ガラスをとりつけた（図2）。上部にはスライド・バルブをつけ、実験直前にこれを大気中に開放して（爆発室の大きさが大きい場合を想定）実験を行った。チューブの下端には、内径25mmのビニール・ホースをつけて全長を1500mmとした。流しカメラは管原式回転ドラム型のものである。（図2）に示してあるように、①、③の位置に圧力計をとりつけ、各々の対面、②、④にフォト・トランジスター（P.T.）をとりつける。薬量を適当に加減して、P.T. ②に感じて、④に感じない状態をつくれば、火炎は②と④の間で消えたことになる。この状態のシュリーレン写真より、消炎時の火炎の挙動を観察

昭和57年4月13日受理

*東京大学工学部反応化学科
〒113 文京区本郷 7-3-1
TEL 812-2111

**労働省産業安全研究所
〒204 清瀬市梅園 1-4-6
TEL 0424-91-4512

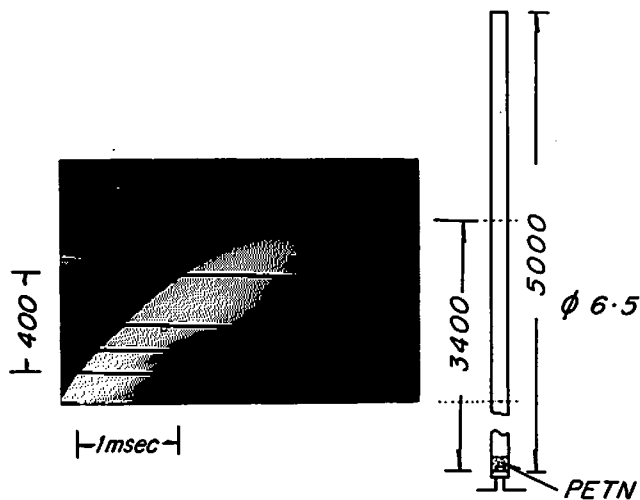


図1 ペンスリットの爆轟により着火した、メタン-空気が当量混合気体が、管中を伝播しそして消炎する状態の流し写真。

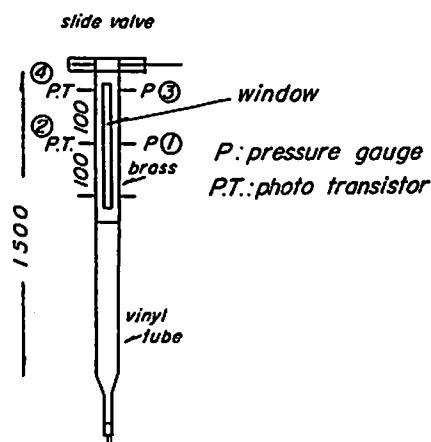


図2 消炎状態のシュリーレン写真撮影用の装置図

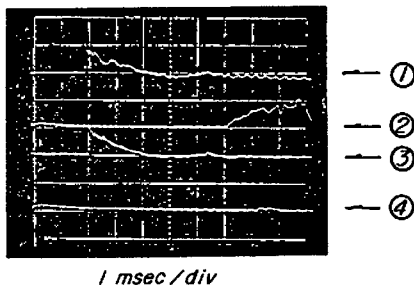
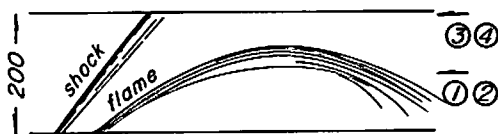


図3 シュリーレン写真の概略図と、オシロスコープ上の圧力計とフォト・トランジスタの出力(①②③④は図2、に対応する)。

することをこころみた。得られた結果を(図3)に示す。これが予期した、P. T. ②と④の間で消炎した状態で、P. T. ②の出力はあるが、④は感じていない。シュリーレン写真を見ると、火炎はうしろの方へひきもどされていることがわかる。これは明らかに、後方の希薄波が消炎に寄与していることが考えられる。

2.2 先行衝撃波と火炎の関係

以上の結果を確認するため、消炎時における先行衝撃波の速度を測定すると共に、衝撃波と火炎の状態を観察するために、(図4)に示すような内径9.2mm、長さ約5mの管に、図示してあるようにP. T. と圧力検出器〔チタン酸バリウム(TiBa)と水晶圧力変換器(PCB)]とをとりつける。爆薬の起爆で

オシロスコープをトリガーして、火炎および衝撃波の到達時間 t_1, t_2, t_3, t_4 を測定する。これと同時に静止写真あるいは、流し写真を併用することによって、消炎時における先行衝撃波の速度を測定すると共に火炎の状態を観察した。(図4)の左側に示してあるように、測定した t_2, t_3, t_4 より圧力検出器間(400mm)の衝撃波の平均速度が求まり、流し写真より得た火炎の状態と一緒に作図すると、消炎時の先行衝撃波の速度が測定出来る。又、P. T. の位置に火炎が到達した時の先行衝撃波速度(P点における)を、

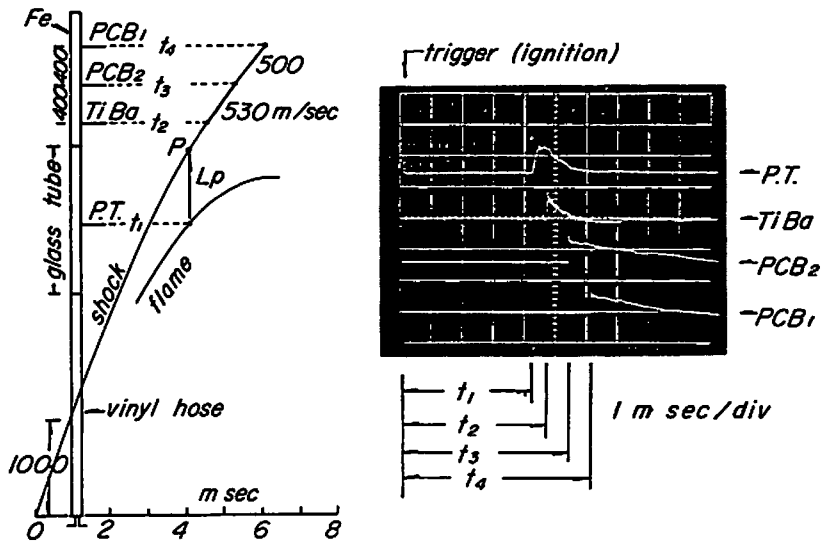


図 4 衝撃波速度および火炎速度測定例

左、消炎時の先行衝撃波速度および、火炎の輝度測定装置路図。右、オシロスコープ上の圧力計とフォト・トランジスターの出力。

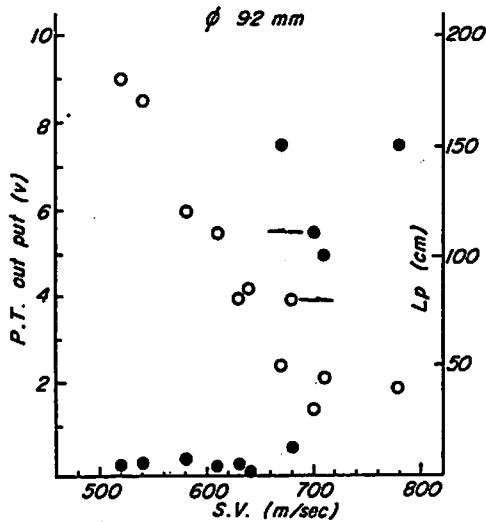


図 5 衝撃波速度と火炎

先行衝撃波速度に対する、火炎の輝度と、先行衝撃波と火炎間の距離。
●：フォト・トランジスターの出力，
○：衝撃波と火炎間の距離， ϕ ：9.2 mm。

実験的に得た衝撃波の減衰式²⁾

$$1/D = 1/D_0 + K \cdot x \quad (1)$$

[x :起爆位置からの距離 (m) D : x における衝撃波速度 (m/sec), D_0 : $x=0$ における衝撃波速度, (3300 m/sec) K : 常数 (0.285×10^{-3})]

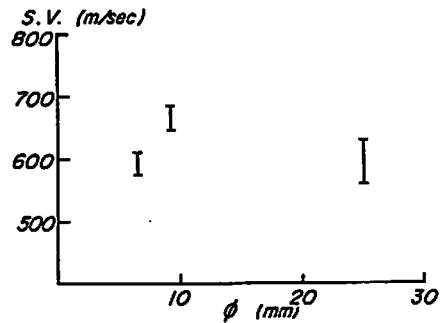


図 6 管径に対する、消炎時の先行衝撃波速度の依存性

より求め、これに対する P.T. の出力をプロットしたものを (図 5) に示す。横軸は点 P における衝撃波速度で、縦軸は P.T. の出力である。同時に、衝撃波と火炎の間隔 (L_p) もプロットしてある。これからわかるように、衝撃波速度が約 680 m/sec あたりを境いとして、火炎の輝度が急激に変化している。即ち、火炎はこのあたりで実質的に消炎し、あとは残光が流れののって進んでいると考えられる。

管径を変え、内径 6.5 mm と、25.4 mm のものについても同様な実験を行い、管径による消炎の影響を調べた。結果を (図 6)、(図 7) に示す。横軸は管径で、縦軸は実質的に消炎したと考えられる時の、先行衝撃波速度 および衝撃波と火炎の間隔である。

3. 考 察

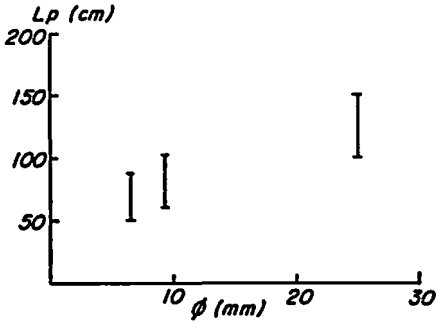


図7 管径に対する、消炎時の先行衝撃波と火炎間の距離

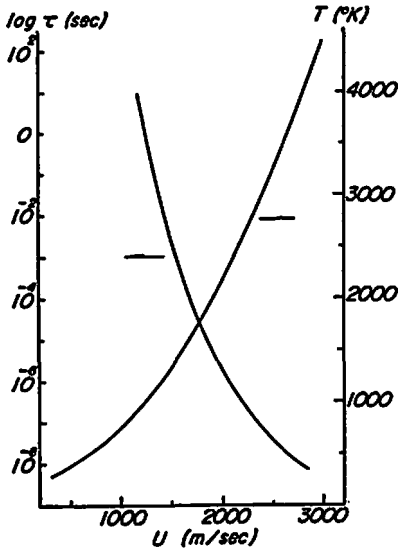


図8 メタン-空気当量混合気体中における衝撃波速度に対する、発火遅れと温度。

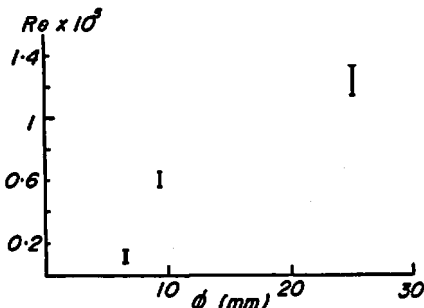


図9 消炎時における未燃ガスのレイノルズ数の管径依存性。(先行衝撃波速度の測定値に基づいて計算を行なった。)

3.1 爆発衝撃波中のメタン-空気混合気体の発火

衝撃波によるメタン系混合気体の発火については、衝撃波管を用い、反射衝撃波によって発火遅れを測定した研究は非常に多いが、ここでは最近の C. K. Westbrook³⁾ がメタンガスと空気の混合気体について実験的に求めた、発火遅れの値を用いて以下の考察を行う。

PETNが爆轟し、メタン-空気混合気体中に入射した際の状態は(図8)に示してある。横軸は爆薬に接しているメタン-空気混合気体中の衝撃波速度で、縦軸は衝撃波速度に対する温度である。又、温度に対する Westbrook の実験式より求めた発火遅れ時間も同時にプロットしてある。図から明らかなように、爆薬に接した混合気体が衝撃波着火をおこすことは歴然としている。この場合は、メタン-空気混合気体の定常爆轟は起らないと考えられるが⁴⁾、C-J爆轟の計算値より大きな速度で管中を伝播するが、自己支持型の爆轟は起さない状態なので、爆轟波速度は次第に減衰する。

3.2 消炎の機構

メタン-空気当量混合気体を、小さなスパーク、赤熱電線あるいは、マッチ等の比較的弱いエネルギーによって着火すると、火炎は一定の燃焼速度で管中を伝播することは判っているので、衝撃波着火では何故実験の如く消炎するのかを考察する。

消炎の理由としては、以下3つの原因を考えた。i) Karlovitz の乱流消炎理論⁵⁾、すなわち予混乱流火炎においては、乱れがある程度以上大きくなると消炎する。この機構にもつげば、消炎は衝撃波中の乱れに起因する。ii) 衝撃波背後の境界層が発達し、冷えている境界層内の流れの部分が大きくなって消炎する。iii) 後方からの希薄波による冷却で消炎する。このうち i) と ii) は相互に関係があるであろう。管径をかえたときに、消炎する状態での未燃気体の流速を計算し、それよりレイノルズ数を計算してプロットする(図9)、レイノルズ数は管径によって大きく異なり、i) でないことが推定される。つぎに ii) について考察してみる。ここでは空気の場合について計算を行うが、爆発性気体はメタンが9%であるので、定性的な議論では混合気体を空気と考えても問題ないであろう。(図10)は Mirels の理論⁶⁾によって計算した、空気の衝撃波における境界層の厚さの最大値である。本実験条件における消炎の際の境界層の厚さは、これより小さい事が計算から確認された。従って、消炎がおこるマッハ数では、自由流が大部分を占めていて、充分火炎が伝播することがうかがえる。さらに Martin の方法⁷⁾により管径9.2mm の場合の管内の温度プロファイル

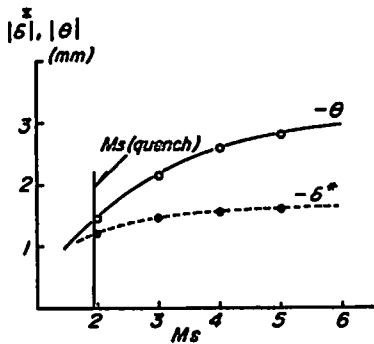


図10 最大境界層厚さ 管径 9.2mm 空気 ($\gamma=1.4$) についてのマッハ数に対する Mirels の理論による maximum separation における境界層の厚さ。
 θ : 運動量厚さ < 0, δ^* : 排除厚さ < 0

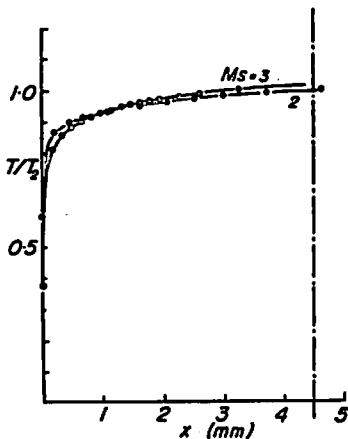


図11 maximum separation における管径方向の温度分布 T_2 : 管の中心の温度, T : X における温度, X : 壁からの距離。

計算すると (図11) の如くなり、境界層による冷却効果は殆んど影響を与えないことがわかる。

つぎに、iii) の後方からの希薄波の効果を考える。

(図12) に衝撃波の挙動を模型的に示してある。まず、図の (A) の如く、爆発衝撃波がメタン-空気混合気体中に投射されるが、大部分は爆薬の爆発生成ガスである (斜線で表示)。メタン-空気混合気体は直ちに反応して平衡状態となる。(黒い部分)。衝撃波の進行とともに (B)、(C) となるが、(C) において衝撃波温度が下がり、メタン-空気混合気体に発火遅れが生じ、衝撃波と火炎は分離してくる。つづいて (D) において、発火遅れがさらに大きくなり、衝撃波着火よりも、火炎の熱伝導および拡散による伝播が支配的となる。

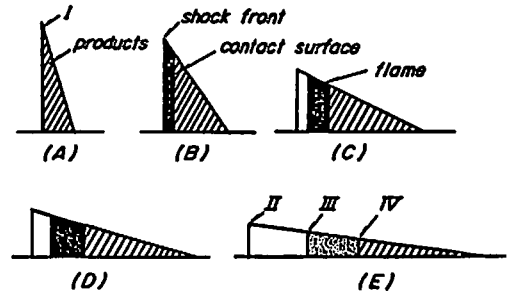


図12 管中を伝播する衝撃波と火炎の挙動の模型図 縦方向は圧力、横方向は距離を表わす。燃焼時 (A) の状態で順次消炎状態 (E) に至る。

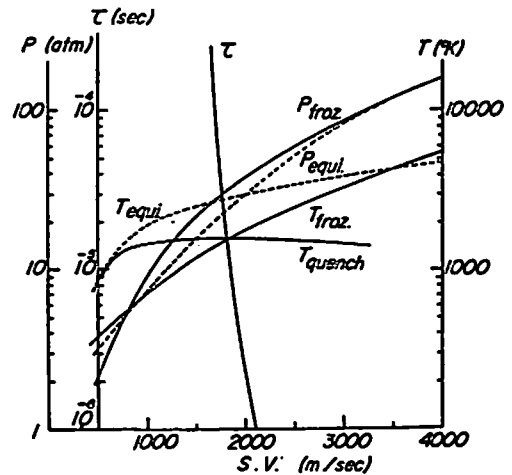


図13 衝撃波パラメーターの計算結果 衝撃波速度に対する、凍結された温度、 T_{froz} 、圧力、 P_{froz} 、および平衡における温度、 T_{equi} 、圧力、 P_{equi} 、また、これらの T_{froz} 、 P_{froz} 、より計算した発火遅れ (τ) もプロットしてある。

(E) において、さらに温度が下がり、火炎は消炎状態となる。

(図13) は衝撃波速度に対し、凍結された温度 T_{froz} 、圧力 P_{froz} 、および、平衡における温度 T_{equi} 、圧力 P_{equi} 、をプロットしてある。またこれらの T_{froz} 、 P_{froz} 、より発火遅れ (τ) を計算してある。(図14) はこの T_{equi} 、と P_{equi} における平衡組成を示してある。

希薄波による消炎の過程の正確なシミュレーションはむつかしいので、以下のような略近法によってこの過程の可能性を考えることにする。発火遅れ時間は、衝撃波速度が 2000m/sec 附近で、 $\sim 0.1\mu$ sec から $\sim 1\mu$ sec 程度変化する。この状態において衝撃波背後の反応生成物は平衡状態を保ちながら変化するものと近似

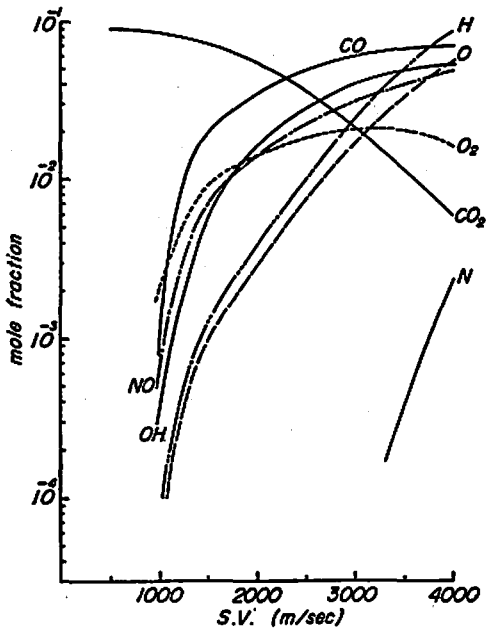


図 14 T_{equil} , P_{equil} における平衡組成の計算結果。

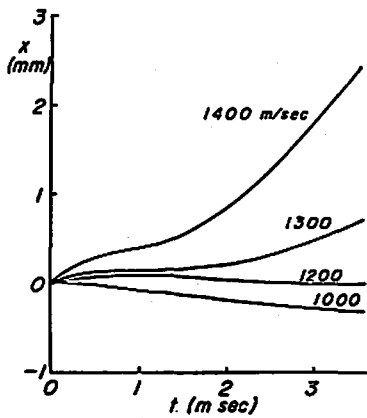


図 15 火炎面の軌跡。縦軸 X: 最高温度と最低温度の平均の位置, 横軸 t: 時間。各々の衝撃波速度における平衡組成が, T_{quench} , P_{quench} まで組成が凍結されたまま冷却された時の火炎伝播の様子を示している。

できる。(図12.(A), 状態 I) この状態から, 衝撃波が減衰する過程を考える。その過程では, 未反応の衝撃波中を燃焼帯が伝播するが, 燃焼速度 $\approx (1\text{m/sec}$ 以

*メタン・空気当量混合物の燃焼速度は 34cm/sec であるが, この場合は先行衝撃波により未燃部分の混合ガスは約 400°K になっているので約 1m/sec となる。

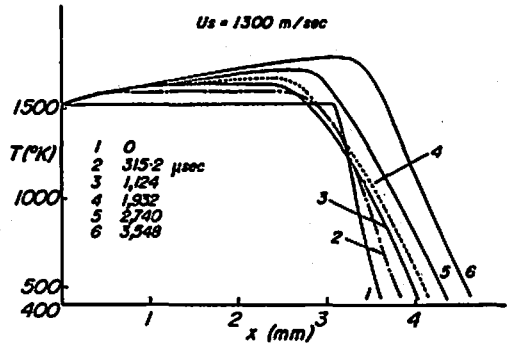


図 16 火炎の温度プロファイル—消炎しない場合。横軸: 軸方向距離, 縦軸: 温度 ($U_s=1300\text{ m/sec}$ の平衡組成が, 凍結されたまま $U_s=650\text{ m/sec}$, $T_{\text{quench}}=440^\circ\text{K}$, $P_{\text{quench}}=3\text{ atm}$ まで冷却された時)。

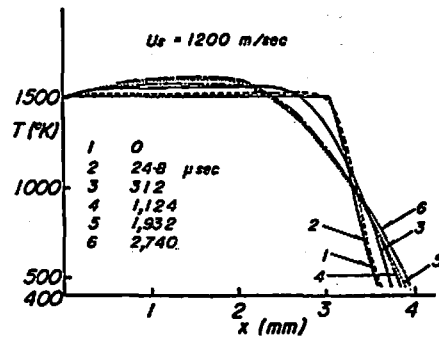


図 17 火炎の温度プロファイル—消炎する場合。図16と同様。($U_s=1200\text{ m/sec}$ の平衡組成が凍結)。

内)は衝撃波速度 ($\sim 1000\text{m/sec}$) に比して充分遅いので, 消炎のおこる衝撃波状態 (図12.(E)) まで反応帯は急激な断熱膨張をうけるものとする。Eの状態の燃焼帯の圧力はほぼ 3 atm 程度である事が実験からわかっている。従って, 既燃側 (図12の(E)のIVの状態)の温度は, 状態 I ($T=3000^\circ\text{K}$, $P=30\text{ atm}$) から 3 atm 迄断熱膨張したとして 1550°K と求められる。一方, Eの状態の衝撃波速度は (図6) から $\sim 650\text{m/sec}$ であるから, 衝撃波直後の状態 (II) は (図13) より求められる。燃焼帯の中で圧力は一定と近似すれば, 未燃ガスの温度 (状態 III) は状態 II から, 3 atm まで膨張したとして求められ, 440°K となる。このような状態で火炎が伝播し得るかどうかをシミュレートした。

計算に用いた基礎式は Spalding の方法⁹⁾ による。熱伝導率, 拡散係数は Hirschfelder らの著書¹⁰⁾ から計算した。ただし常温, 常圧下のメタン—空気の当量混合気体の燃焼速度に合うように多少修正してある。

メタン酸化の反応機構、素反応速度はOlsenら¹¹⁾および、Westbrook¹²⁾のものから適当に取捨選択し、76の素反応を考慮した。反応方程式はTsatsaronis⁹⁾らの方法に従い線型化してある。

この計算を実行する場合、境界条件として既燃側(状態IV)の各speciesの濃度を知る必要があるが、そのラジカル濃度は状態Iからの冷却が急速におこるので、 T_{IV} (=1550°K), P_{IV} (=3 atm)における平衡濃度より、はるかに多量のラジカルが存在すると考えられる。そこで、衝撃波速度が2000~1000m/secにおける平衡濃度がそのまま凍結されたと考えて、状態IVの各speciesの濃度を与えて計算を行なった。火炎の平衡温度の示す軌跡を(図15)に示すが、ラジカル濃度が1300m/secの衝撃波の平衡組成が凍結されたとした場合と、1200m/secの場合との間で火炎が伝播し得なくなる事がわかる。この時の両者の火炎のプロファイルを(図16)、(図17)に示す。図16、図17において既燃側の温度は状態I→IVの断熱膨脹により1550°Kとなっているが、そこに存在するラジカル濃度は、 $U_i=1300$ m/sec (図16) 又は1200m/sec (図17)の衝撃波速度の平衡組成が急激な冷却によりそのまま凍結されると考えている。即ち、即燃側では温度は断熱火炎温度(2147°K)より低いが、ラジカルは1550°Kの平衡組成より多い状態になっている。ラジカルが多量に存在するときには、それらの再結合による発熱のために、既燃側の温度は上昇し、その発熱に支えられて火炎は伝播していく(図16)。一方、図14に示されるように $U_i=1200$ m/secの平行組成におけるラジカル濃度は、1300m/secのそれに比してはるかに小さい。従って、この場合には発熱も小さく、既燃側の温度上昇もわずかで、火炎はほとんど停止している(図17)。

以上から火炎が消炎する機構として、希薄波による火炎の冷却によってラジカルが減少し、その結果、火炎を維持するに足る発熱量が得られなくなると考えられる。これらの計算では例えば反応速度定数や拡散係数、熱伝導率にまだ不確かさがあり、また用いた簡略化のために実験を完全にシミュレートしているとはいえないが、少なくとも定性的にはこのような機構で消炎がおこることは充分ありうることを示しているといえよう。

謝 辞

本研究の一部は、第11回火技奨によったものである。また、東大工 平野助教授に多くの討論をいただいたことを感謝する。

文 献

1) 村田勉, 衝撃波によるメタンガスの点火に関する考察(I), 工火誌, 11, No. 1, P. 17

日野熊雄, 爆薬によるメタン空気混合物の着火機構, 工火誌, 14, No. 3, P. 163

大川禎三, 吊し爆発によるメタン着火について, 工火誌, 18, No. 4, P. 304

篠原昌央, 爆薬によるメタン空気混合ガスの着火性について, 工火誌, 19, No. 4, P. 240

吉河儀一, 試験坑道における炭鉱爆薬によるメタン着火源の形成機構, 工火誌, 26, No. 5, P. 277

鈴木輝彦他, 炭鉱用含水爆薬に関する研究(I), 工火誌, 41, No. 2, P. 84

- 2) T. Hikita et al, Study of Shock Waves from High Explosives, 6th Symp. on Comb. P. 379 ('56)
- 3) A. Lifshitz et al, Shock-Tube Investigation of Ignition in Methane-Oxygene-Argon Mixture. C & F 16, P. 311 ('71)
C. K. Westbrook et al, Chemical Kinetics in LNG Detonation. Gasdynamics of Deto. and Explosions, Vol. 75 Progress in Astronautics and Aeronautics, P.193 ('79)
- 4) H. Matsui et al, On the Measure of the Relative Detonation Hazards of Gaseous Fuel-Oxygene and Air Mixture, 17th Symp. on Comb. P. 1269 ('78)
- 5) B. Karlovitz et al, Study on Turbulent Flames
A: Flame Propagation Across Velocity Gradients
B: Turbulence Measurement in Flames. 4th Symp. on Comb. P. 613 ('52)
- 6) H. Mirels, Shock Tube Test time Limitation due to Turbulent Wall Boundary Layer, A. I. A. A. J. 2, 84 ('64)
- 7) W. A. Martin, An Experimental study of the Turbulent Boundary Layer Behind the Initial Shock Wave in a Shock Tube, J. of the Aerospace Science, 25, 644 ('58)
- 8) D. E. Spalding et al, A calculation procedure for the prediction of laminar flame speeds, C & F, 17, 55 ('71)
- 9) G. Tsatsaronis, Prediction of Propagating Laminar Flames in Methane, Oxygene, Nitrogen Mixtures, C & F, 33, 217 ('78)
- 10) J. O. Hirschfelder et al, Molecular theory of Gases and liquids, Wiley and Sons, New York, London ('67)
- 11) D. B. Olsen et al, Combustion of Methane in fuel-rich Mixtures, C & F, 32, 151 ('78)

**The Propagation and the Quenching Processes of The Flame behind
the Shock Wave of the CH₄-Air Mixture**

I. Studies on the One Dimensional Shock Wave

by Kuniaki YONEDA*, Mitsuo KOSHI*, Tetsuro ASABA*,
Hidenori MATSUI** and Hiroyuki MATSUI*

The quenching process of a flame in a stoichiometric mixture of CH₄ and air behind a decaying shock wave produced at the detonation of an explosive has been studied experimentally. The experiment was performed in tubes with constant cross section and the conditions of the preceding shock wave when the flame was quenched were monitored.

It was found that the flame was quenched when the shock velocity decreased to about 600~700 m/sec.

The mechanism of the quenching process was discussed. It was concluded that the flame was quenched by the rarefaction wave produced at the initial explosion.

(*Department of Reaction Chemistry Faculty of Engineering, University
of Tokyo

**The Research Institute of Industrial Safety Tokyo, Japan)