デトネーションへの遷移の一機構*

藤原 俊隆**・矢郷 篤三***

One of the Mechanisms of Transition to Detonation

Toshitaka FUJIWARA and Tokuzo YAGO

1. 序 論

デトネーション波に付随する非定常かつ不安定な3次元構造は、かなり微視的に解明されている^{1)~4),7),8)}。不安定なデトネーションを制御して、もっとおとなしく燃焼するように変え、エンジンその他に応用することは、デトネーションを研究する1つの目的である²⁾。このために、火炎が加速されるところで突然デトネーションに遷移する機構の研究が多くなされている。

P. A. URTIEW と A. K. OPPENHEIM は最近酸素素混合気体における遷移機構解明のために、精度のよい圧力ゲージ²⁾と高速写真技術を用いた実験結果を発表した¹⁾。彼らの発見した遷移の4つの機構のうちで、最も簡単でかつ考え易いのは、比較的弱い2つの衝撃波の合体によって生ずる接触面上の着火から生ずる遷移である。本論文では、この着火が衝撃波の合体によってもたらされる1,200°K程度の高温のためであると考えた。すなわち URTIEW と OPPENHEIM も示唆しているように、この高温が反応誘起時間を減少させると考え、理論計算を行ない、彼らの実験とよく一致する結果を得た。

2. 遷移の4機構

従来、加速されつつある火炎の前面と、その前方に

第1図 遷移直前の状況

- ①未燃静止気体、②衝撃波、③圧縮高温未燃気体
④火炎前面、⑤既燃気体

生成されている precursor shock とが合体することがデトネーションへの遷移機構と考えられていた(第1図)。URTIEW と OPPENHEIM はこれに対して“explosion in explosion”なる自己着火が正しい機構であることを示した。彼らによると自己着火には4つの型がある。すなわち、

- (1) 乱流火炎と precursor shock の間に生じるもの。
- (2) 乱流火炎の不規則な運動によって生じた head shock の後方で生じるもの。
- (3) head shock の上で生じるもの。
- (4) precursor shock と head shock の合体により生じた接触面上で起こるもの。

である。これら4つの型は点着火を特色とするグループ(1, 2, 3)と面着火を特色とするグループ(4)とに分けられる。点着火とデトネーション波、自走するデトネーション波および横波の関係は第2図に示されたとおりである^{1),4),8)}。

第2図 着火によるデトネーションの発生

3. 実験の解析

この節では面着火の場合について URTIEW と OPPENHEIM との得た結果を解析する。第3図は初期圧 $p_0=83.7$ torr, 混合比 $H_2:O_2=1:1$ の酸素素混合気体中で、デトネーションが面着火によって発生する状況を示す高速度ストロボ・シュリーレン写真である。5 μ sec おきにとられた写真は、火炎、衝撃後、デトネーションおよび接触面の挙動をはっきり示す。まだ離

* 昭和43年2月5日原稿受理

** 名古屋大学工学部航空学科

*** 東京大学工学部航空学科 現日産自動車株式会社

第3図 遷移のストロボ・シュリーレン写真

(Prof. OPPENHEIM, Royal Society of London の好意により [1] より転載)

れていた前方の precursor shock と後方の head shock が、ほぼ $30 \mu\text{sec}$ で合体し、以後合成衝撃波と接触面が発生している。

合成衝撃波の後方を接触面が追いつける様子は $40 \mu\text{sec}$ 以後に見られるが、これは第4図と第5図に引き伸ばされている。ちょうど $45 \mu\text{sec}$ の写真に接触面上の着火が見られる。衝撃波合体後 $15 \mu\text{sec}$ である。着火は $50 \mu\text{sec}$ の写真に明確に認められ、 $55 \mu\text{sec}$ で前方の合成衝撃波に追いつき、 $60 \mu\text{sec}$ では“自走する”デトネーションが形成されている。このときでも乱流火炎前面は未だ接触面の後方にあり、中間には未燃気体が存在している。すなわち第2節に述べたように火炎と衝撃波の合体なしにデトネーションが発生している。面着火によって生じたデトネーション後方には横波が存在しないが、 $95 \sim 105 \mu\text{sec}$ の写真が示すように後方の点着火は横波を生ずる。このことは接触面上の

着火が一次元的であることを裏づける。

さて、本論文で扱われる問題は $x-t$ 線図では第6図のように与えられよう。実験写真から得られる precursor shock と head shock の速度から合成衝撃波と接触面の速度および接触面上の温度（領域⑤の温度）を計算により求め、実験写真に観測される合成衝撃波と接触面の速度と比較する。第3図から3つの衝撃波の速度は

$$\text{precursor shock: } v_p = 720 \text{ m/sec}$$

$$\text{head shock: } v_h = 1,730 \text{ m/sec}$$

$$\text{resultant shock: } v_R = 1,870 \text{ m/sec}$$

である。

第6図に示されるように2つの衝撃波の合体によって生ずる流れはつぎの5つの領域に分けられる。

- ①: 初期状態 (precursor shock の前方)。
- ②: precursor shock と head shock の間。

第4図 第3図の拡大図

(Prof. OPPENHEIM, Royal Society of London の好意により [1] より転載)

第5図 第3図の拡大写真

(Prof. OPPENHEIM の好意により [1] より転載)

- ③: head shock 後流. 合体後は膨脹波が押し寄せる.
 ④: 接触面後流.
 ⑤: 合成衝撃波と接触面の間, 温度最大. 着火はこ

第6図 衝撃波全体の X-t 線図

の領域で起こる.

計算の結果, 合成衝撃波の伝播マッハ数 $M_R = 4.095$ が得られた. したがって $v_R = M_R \times a_1 = M_R \times \sqrt{\gamma R T_1}$
 $= M_R \sqrt{\gamma \rho T_1 / W} = 4.095 \times 442 \text{ m/sec} = 1,810 \text{ m/sec}$.
 この値は実験写真から求めた値 $v_R = 1,870 \text{ m/sec}$ と良く一致していると言えよう. ここで比熱比 $\gamma = 1.4$, R は普遍気体定数, $T_1 = 288^\circ\text{K}$, 分子量 $W = 17 \text{ g/mole}$ ($\text{H}_2 : \text{O}_2 = 1 : 1$).

計算された温度プロファイルは第7図のようになる. 衝撃波合体前における最高湿度は head shock 後方に

第7図 温度プロファイルの比較

存在し 899°K であるのに対し、合体後の最高温度は領域⑤において実現されその値は 1,208°K に達する。

なお、実験においては度重なる圧縮波の通過により領域①の温度が仮定された値 $T_1=288^\circ\text{K}$ よりも高くなっている可能性がある。これを調べるため $T_1=339^\circ\text{K}$ と仮定した場合における計算結果を $T_1=288^\circ\text{K}$ の場合と比較する。

$T_1(^{\circ}\text{K})$	M_R	$v_R(\text{m/sec})$	$T_5(^{\circ}\text{K})$
288	4.095	1,810	1,208
339	3,734	1,792	1,238

これによると、 v_R , T_5 は T_1 による影響をほとんど受けない。

4. 反応誘起時間の計算

SHOTT と KINSEY によると酸水素反応の初期段階において重要な素反応はつぎのようなものである⁶⁾。

これらの反応を考慮した反応誘起時間の計算は SHOTT と KINSEY によって既に行なわれており、その結果は衝撃波管を用いた実験結果と非常に良い一致を示している。彼らの結果から、URTIEW と OPPENEHEIM の実験状況における反応誘起時間を求めると

第8図 X-t 線図上での着火過程

$$\tau_{\text{calc.}} = 18.6 \mu\text{sec}$$

となる。この値は実験写真から得られた値

$$\tau_{\text{obs.}} \cong 15 \mu\text{sec}$$

と良く一致している。かくして着火機構4つのうちで、第4の面着火の型が明らかにされた。すなわち高温による反応誘起時間の減少である。

ただここで、つぎのことに注意すべきである。本論文で明らかにされたのは着火機構のみであり、着火により生じた反応領域が成長して前方の衝撃波に追いつき、やがて自走する CHAPMAN-JOUQUET デトネーションを形成する非定常過程の研究は今後に残されている。

最後に、図画作成に尽力いただいた東京大学工学部航空学科の関本成雄君に感謝する。

文 献

- 1) P. A. URTIEW and A. K. OPPENHEIM, Proc. Roy. Soc., Vol. A 295, 13, 1966.
- 2) A. K. OPPENHEIM, AIAA paper, No. 66-517, 1966.
- 3) R. A. STREHLOW, A. J. CROOKER R. E. CUSEY, Combustion and Flame, Vol. 11, Aug., 339, 1967.
- 4) R. I. SOLOUKHIN, Shock Waves and Detonations in Gases, Mono Book Coop., Baltimore, 1966.
- 5) G. RUDINGER, Wave Diagrams for Non-Steady Flow in Ducts, D. Van Nostrand Company Inc., New York, 1955.
- 6) G. L. SHOTT and J. L. KINSEY, J. Chem. Phys., Vol. 29, No. 5, 1177, 1958.
- 7) H. JONES, Proc. Roy. Soc., Vol. A 248, 333, 1958.
- 8) R. A. STREHLOW and F. D. FERNANDES, Combustion and Flame, Jun., 109, 1965.