爆 発*

——特に気体のデトネーションについて——

正 田 強**

1. はじめに

多くの化学過程のうちでも爆発は特に複雑怪奇な現象で、その全貌を把握するのは容易でないが、爆発を究明し制御することは、爆発エネルギーの利用の面からも、また災害防止の面からも重要なことである。

この十数年爆発現象特にその物理学的、化学的基礎研究の進歩は著しいものがあるが、それにもかかわらず現実に爆発事故の数は減少しないで、むしろ重大事故が増加する傾向にある。これは爆発制御または防禦対策面での化学工学的研究が遅れていることにも起因すると考えられる。多くの人がまったく安全と考えているプロセスが実はかなりの危険性をはらんでいることを看過している場合、またある程度危険を予測しながら爆発の規模や威力の推定に誤算がある場合もあろう。

わが国には大規模な爆発実験の恒久設備が一つもないという現状は、化学技術者の多くが爆発の実態を知る機会が少ないことを意味し、誠に寒心に堪えない。

本稿は爆発現象のうちで、特に気体のデトネーションについての基礎概念を紹介するという意図で執筆した。

2. デトネーションとは何か

一般に爆発と呼ばれている現象は“圧力の急激な発生または開放の結果、爆音を伴って容器が破裂したり、気体が膨張する過程である”と定義される。

化学的爆発のなかには反応形態から見て、燃焼(combustion, deflagration)とデトネーション(爆轟, detonation)の二種に分類される。燃焼では、火炎の静止媒質中への伝ば速度が媒質中の音波速度より低いが、デトネーションでは逆に超音速となる。流れている媒質中へ燃焼火炎が伝わる時、見掛け上超音速に見えることがあるが、流速を差し引いて音速以下であれば、それはやはり燃焼の部類に入る。

燃焼では火炎の伝ばは主に熱伝導によって支配され、バーナー法などで測った正常燃焼速度は $0.1 \sim 10 \text{ m/sec}$

の程度である。一方デトネーションでは火炎伝ばは衝撃波によるもので、前方への熱伝導はほとんど関与しないほど高速度であり、 $1,000 \sim 3,500 \text{ m/sec}$ に達する。

たとえば、水素と酸素の混合気体中をデトネーションが進む場合、未反応ガスはデトネーション波の先端の衝撃波により約 $1,800^\circ\text{K}$ に瞬間的に加熱され、非常に早い反応の後 $3,000^\circ\text{K}$ 位になる。すなわち反応熱は衝撃波を一定の速度で前方へ送り出すのに消費されており、“デトネーションとは衝撃波と燃焼波とが一体となって進行する波”であると定義することができる。

3. 管中を伝わるデトネーション波の状況

図1(a)の管中にデトネーションが左端から右へ進んで距離 X に達したとき、管内の圧力波形は(b)に示すようになる。

(a) 左端でデトネーション発生、 X 迄進行
(b) このときの圧力波形、点線は左端開放のとき
(c) 反射波が X まできたときの圧力波形
(d) X 点における圧力の時間的変化

図1 管中デトネーションの圧力波形

* 昭和41年4月9日 受理

** Teutomu Hikita 東京大学工学部 燃料工学科

図2 衝撃波と希薄波のモデル

図3 可燃性ガスと酸素の種々の割合の混合物についての爆速と、無次元パラメタφの関係
横軸はデトネーションのマッハ数 M_D (爆速を混合ガスの音速で割った値)
縦軸は $\phi = \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{Q}{C_{p1}T_1}$: Q 爆発熱, m_1, m_2 は原系と生成系の平均分子量, C_{p1} と T_1 は混合ガスの定圧比熱と温度

表1 デトネーション圧力 (p_2) と反射圧 (p_5)
(初期圧=1atm)

ガス	p_2 (atm)	p_5 (atm)	p_5/p_1
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$	29.3	73.3	2.50
$2\text{H}_2 + \text{O}_2$	18.8	46.4	2.47

波の速度すなわち爆速は U で一定、反応完了面の圧力は p_2 、その背後に希薄波 (等エントロピー膨張の波) がつづき、 $X/2$ で一定圧力 p_3 となる。波面でのガス流速は u_2 、それは次第に減少して、 $X/2$ のところでゼロとなる。すなわち静止する、左端が開放されているときは図1(b)の点線のようにガスは逆方向に速度を持ち、 p_3 も減少をつづけて左端で大気圧と一致する。

デトネーション波が右の密閉端に衝突すると圧力は急上昇して p_2 の約2.5倍になる。その後反射衝撃波となって、急速に減衰しつつ左方へ向う。管内の壁の一点のうける圧力波形は (d) のようになる。メタン・酸素および水素・酸素系のデトネーションの圧力 p_2 とそれが堅い壁に正面衝突したときの反射圧 p_5 を表1に示す。

表1の値は計算値であるが、実測値もこれらと良く一致する。このような管内波動の圧力、温度、速度などの特性値は衝撃波および希薄波の理論から容易に計算することができる。

4. 衝撃波、デトネーション波 および希薄波の基礎式

衝撃波および希薄波の理論と特性値計算法は Rudinger の書¹⁾に詳しく解説されているが、ここではごく簡単に基礎式を示すに止める。

図2に希薄波と衝撃波の概念を得るための模型図を示し、圧力 (p) とガス流速 (u) の変化を付記した。ここでは $u_1=0$, $u_3=0$ とする。

衝撃波の式は図2のモデルから、質量、運動量、およびエネルギー保存則を書くことにより得られる。

$$\rho_1 U = \rho_2 (U - u_2) \quad (1)$$

$$p_1 + \rho_1 U^2 = p_2 + \rho_2 (U - u_2)^2 \quad (2)$$

$$h_1 + \frac{1}{2} U^2 = h_2 + \frac{1}{2} (U - u_2)^2 \quad (3)$$

ρ は密度、 h はエンタルピー、

(1)~(3)より衝撃波のエネルギー関係を示すランキン・ウゴニオーの式 ($R-H$ 式)

$$h_2 - h_1 = \frac{1}{2} (p_2 - p_1) (v_1 + v_2) \quad (4)$$

が得られる。ここで $v=1/\rho$ 、(4)式は $h=e+pv$ の関係を使うと、

$$e_2 - e_1 = \frac{1}{2} (p_1 + p_2) (v_1 - v_2) \quad (5)$$

e =内部エネルギー

デトネーションの場合は反応熱 Q を e_2 の外に出して

$$e_2 - e_1 = Q + \frac{1}{2}(p_1 + p_2)(v_1 - v_2) \quad (6)$$

この他に状態方程式と生成物組成およびそのエネルギーに関する知識が必要である。それを

$$p_2 v_2 = n_2 R T_2 \quad (7)$$

$$n_2 = n(p, T) \quad (8)$$

$$e_2 = e(T) \text{ または } h_2 = h(T) \quad (9)$$

と書けば、(1)~(3)と(7)~(9)の6式から、ある U に対して一般に $(p_2, n_2, T_2, e_2, u_2, v_2)$ に関する2組の解が出る。大きい p_2 値を与えるのを“強いデトネーション”，小さい p_2 の方を“弱いデトネーション”というが、実際に安定なデトネーションとして存在しうるのは、両者が一点に合致し最低の U を示すときで、これをチャップマン・ジュゲの条件(C-J条件)という。

反応完了時の気体中の音速を a_2 とすればC-J条件は

$$U = a_2 + u_2 \quad (10)$$

と書くことができる。C-J条件はデトネーション波では反応完了点で与えられるので、これをC-J点と呼ぶ。

C-J点の特性値計算は試行錯誤法で行なうが、詳細は文献²⁾に譲る。Morrisonの計算例³⁾を図3に示す。

図3はデトネーションのマッハ数($M_D = D/a_1$)を、無次元パラメータ ϕ の関数として図示したもので、 $\phi = \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{Q}{\bar{C}_{p1} T_1}$ は、原系と生成物の分子量比、と加熱因子 $Q/\bar{C}_{p1} T_1$ の積である。図に見るように爆速は、ガスの種類と混合比が違っていても、混合気体の音速、加熱因子、分子量比によって近似的に表わせることが分る。

希薄波は圧力減少の波で、デトネーション波のC-J面背後から出発する。その関係はつぎの式で示される。

$$x = (u + a)t \quad (11)$$

$$u_2 - u = \frac{2}{\gamma - 1}(a_2 - a) \quad (12)$$

x は時間 t のときのガスの座標、 u_2, a_2 はC-J点でのガス流速と音速、 γ は比熱比。

(10)式より

$$U t = x_2 = (a_2 + u_2)t \quad (13)$$

ゆえに、

$$u_2 - u = \frac{2}{\gamma + 1} \left(\frac{x_2 - x}{t} \right) \quad (14)$$

$p_2 \gg p_1$ とすれば、(1)~(3)式より

$$u_2 = U - a_2 \doteq \frac{a_2}{\gamma} \quad (15)$$

$$u_2 - u = \frac{2a_2}{\gamma} \left(\frac{x_2 - x}{x_2} \right) \quad (16)$$

すなわち希薄波中のガスは断熱膨張し、その速度は距離に正比例して減少し、 $x = x_2/2$ で $u = 0$ となる。

圧力は同様にして、

$$\frac{p}{p_2} = \left(1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \frac{x_2 - x}{x_2} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}} \quad (17)$$

図4 H₂-Air系におけるH₂濃度と爆速
1は理論計算値、2は実験値。

表2 デトネーション限界(燃料% vol.で示す)⁴⁾
(1 atm, 常温)

ガ ス	下 限	上 限
H ₂ -O ₂	15	90
H ₂ -Air	18	59
CO-O ₂ (dry)	—	83
CO-O ₂ (wet)	38	90
(CO+H ₂)-O ₂	17.2	91
(CO+H ₂)-Air	19	59
NH ₃ -O ₂	25	75
C ₂ H ₂ -O ₂	3.5	92
C ₂ H ₂ -Air	4.2	50
CH ₄ -Air	6.5	12
C ₃ H ₈ -O ₂	3.2	37
i-C ₄ H ₁₀ -O ₂	2.8	31
C ₄ H ₁₀ O-Air (エーテル)	2.8	4.5
C ₄ H ₁₀ O-O ₂ (エーテル)	2.8	>40

5. デトネーションの限界

ふつうに爆発限界、爆発範囲と呼ばれる言葉は、燃焼限界と同意に使用される。安全工学的には、燃焼しうる組成はデトネーションにも入る可能性があると考えた方がよいので、爆発という強い響きの言葉を使うのである。

しかし、すでに述べた通り、デトネーションと燃焼とははっきり区別される現象であるから、デトネーションの限界ということもよく理解しておく必要がある。

デトネーションを起こしうる組成範囲は燃焼限界の内側にあり、燃焼限界と同じく、圧力、管径、その他の条件によって変動する。したがって文献記載の限界値は特定条件下の値にすぎないことを銘記すべきで、条件が変われば限界値も多少変動することを忘れないようにしたい。

表2はLewisの書⁴⁾からの再録であり、図4はWe-ndlandt⁵⁾のH₂-Air系についての測定結果と理論爆速値を示す。ここではH₂-Airのデトネーション下限は

図5 デトネーションの限界組成と管径の影響⁴⁾

横軸: d_{gr} はデトネーションを起こす限界の管径
縦軸: 各混合ガス中の可燃ガス濃度 (C) を化学量論比組成 (C_{st}) の可燃ガス濃度で割った値

表3 デトネーション限界に対する圧力の影響 (Laffitte²⁾)

ガス	圧力 (atm)	下限 (%)	上限 (%)
H ₂ +O ₂	1	15	90-90.4
"	8.7	13.9-14.3	91-91.3
H ₂ +Air	1	15.5-18.8	—
"	8.7	14.8-15.1	—
NH ₃ +O ₂	1	25.0-25.4	—
"	8.7	27.2-27.5	—

H₂ 15% でこのときの爆速は 900m/sec である。Lewis の表では 18% で、また他の実験では 20%, 25% などというもある。

また図5は Wagner の研究室での測定値⁴⁾ であり、横軸は管径 (d_{gr} , mm), 縦軸は組成で化学量論比組成 (C_{st}) に対する燃料の濃度 (C) の比で示してある。管が細くなるほどデトネーションの組成範囲はだんだんと狭くなることを示している。

限界に対する圧力の影響についての一例を表3に示す。燃焼限界の上限に対しては圧力の効果はかなり大きい、デトネーション限界に対してはそれほど大きくないようである。

また圧力を 1atm より下げてゆくときも限界値はあまり変わらないが、ある圧力以下ではデトネーションしなくなる。(H₂ 18%+Air) ではこの圧力下限は 100~200 mmHg である。

温度の影響は実験が少ないのではっきりしないが、H₂-Air で 20~490°C まで予熱して限界を測ったところ、ほとんど変化しなかったという。理論的には温度上昇は限界を広げる効果をもつことが予測されるから、もっと多くの実験が必要であろう。

管径の影響は大きい。

管が細くなると管壁への熱伝導と摩擦のため爆速は低下し、ついにデトネーションは中断してしまう。つぎに述べるように燃焼からデトネーションへの転移は管の細いほど早く起こるのであるが、一度生じたデトネーションが衰えて行くのは細い管ほど早いのである。

熱伝導と摩擦によるエネルギー損失により生じた希薄波は爆発生成ガス中を音速で管軸方向へ進む。希薄波が管軸に達するまでの時間は半径 r を音速 a で除した値で、これが反応時間 t_r より小になる条件

$$r/a < t_r$$

では反応帯は希薄波のため弱められ、有効エネルギーは減少して爆速は低下する。

Kogarko ら³⁾ が H₂-Air について 305mm 径、12.2 m 長さの管で限界を測定したときは H₂ 15~63.5% の範囲でデトネーションが生じたが、20mm 径の管では H₂ 18~59% の範囲となった。また CH₄-Air について 30mm 径の管でのデトネーション限界は CH₄ 6.3~13.5% であり、これが 22mm 径の管に入ると途中で中断したという。Payman ら³⁾ の実験では、CH₄-Air は 30mm 径の管中では爆速 1820~1950m/sec の非定常なもので、18mm 径の細い管に移ってから、30cm ほど進んで中断した。筆者らの実験では CH₄-2O₂ は 0.8mm の細管でもデトネーションは発生し不安定ではあるが伝わる。また反応熱の少ない組成の場合はデトネーションが発達したり[衰退したり、週期的に変動しながら進むこともあり、途中で中断してしまうこともある。

6. 燃焼からデトネーションへの転移

これについては“化学と工業”に総説⁹⁾を書いたので、ここではその後の発展をも含めて簡単に述べる。

管中に火炎が発生すると、条件によっては次第に加速されてある距離進んだ所でデトネーションに転移する。

この距離を爆轟誘導距離という。これは

- 燃焼熱の多い化学量論比組成に近いほど、
- 正常燃焼速度の大きいものほど、
- 圧力の高いほど、
- 温度の低いほど、
- 管径の細いほど、
- 管壁が粗であるほど、または流れを妨げるものがあれば、短くなり、デトネーションに移り易い。

メタン・酸素系混合ガスについて例示しよう。水素・

図6 $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ 系混合ガス (1 atm) が 3×15 mm の角筒内で燃焼からデトネーションへ転移する状況のシュリーレン流し写真

酸素系もメタン・酸素系に近い値を示す。

表4は $\text{CH}_4\text{-O}_2$ 系について圧力、温度、管径の影響を示す例である。

表4に見るように誘導距離は各条件によって著しく変動する。太い管でも内部に針金を数回巻いたものを挿入すると燃焼はたちまちデトネーションに転移することが多く、これは任意の場所でデトネーションを起こさせる目的にも使用される。

では一体何故どのようにして転移が生ずるのであろうか。図6を見ていただきたい。これは筆者の研究室で撮影した水素-酸素系の爆轟転移の状況を示すシュリーレン写真の例である¹¹⁾。縦軸は距離、横軸は時間で、傾斜の大きい線ほど速度の早い波動である。左下方より燃焼波が低速で進み、その前方に黒い線群を形成して燃焼波より高速で進む衝撃波（圧縮波）が見える。この衝撃波は燃焼の加速によって次第に強められ、その中のガスは圧力も温度も次第に高くなり、ついに火炎より前方で自然発火を起こす。発火は一点でなく方々で起こっているのが見える。そのため前方へ送り出される衝撃波は急激に成長し、波面直後ですぐに化学反応を開始させ、しかもごく短時間に反応を完了させるに至り、デトネー

図7 都市ガス-空気混合ガスの火炎速度および圧力の変化 (径 25 mm 管, 1 atm) (Turin, Huelber)

表4 メタン・酸素系混合ガス中の爆轟誘導距離 (D cm) に対する組成、圧力、温度、管径の影響¹⁰⁾

組成	圧力 p	温度 t	管径 ϕ
$\text{CH}_4\%$	1 atm	$^\circ\text{C}$	ϕ mm
15	$D=105$ cm	45	18
33	78	5	12
50	160	50	5
			1
条件	15 mm ϕ , 40°C	$\text{CH}_4 50\%$, 1 atm	$\text{CH}_4 33\%$, 1 atm

ション波が形成される。右上方へ高速で伸びる波面がデトネーション波である。

このようにデトネーションへの転移は燃焼の加速によって火炎前方に衝撃波が形成され、そこで高温高压となった未反応ガスが自然発火することによって生ずることが分る。燃焼の加速は波面の乱れによって生ずるもので、そのような乱れは管壁の粗さ、または障害物によって促進されることは当然であるが、滑らかな壁または球状に自由に広がる火炎の場合でも、デトネーションへの転移が容易に起こることでも分るように、燃焼生成ガスの冷却・凝縮に基づく希薄化が火炎の背後から追いついてきて生ずる火炎面の乱れも燃焼の加速を起こす原因となる。

燃焼がデトネーションに転移した直後は異常に高い圧力と速度を示すのがふつうで、たとえば図7は都市ガス

図8 広い管へ入るとデトネーションは中断する

図9 von Neumann らによる反応帯の圧力波形

がデトネーションに移った直後には58atmという高い圧力になり、間もなく安定な18atmのデトネーションに移ることを示している。筆者らの実験でも同様の曲線が得られた。ガラス管で実験したときは、燃焼の範囲は管は破壊せずに残り、デトネーションに入った直後はガラスは粉々に粉砕されるが、安定デトネーションの部分はやや大きい破片となる。

管径が大きくなるほど爆轟誘導距離は長くなるから、短い長さの管でデトネーションしないからといって安全とは言えない。100mまたはそれ以上の長さの管で実験している例もある。

径の小さい管が太い管へ接続されているときは、デトネーションは急に広い所に出て、側面から衝撃波の希薄化が起こり、温度が下がるため反応が遅くなり、デトネーションは、図8のように円錐状に取れんして中断してしまう。衝撃波と燃焼波の分離が起こるためである。しかし、太い管中へ燃焼の火炎が伝わり、これは次第に加速されて、ある距離進むと再びデトネーションを生ずる。

長いパイプラインのデトネーションを中断させる一つのアイデアはこの原理を使う。たとえば、パイプの中間に太い管を置き、いったんデトネーションを中断させて、細い管中をしばらく燃焼として通過している間に、時間をかせいで電磁弁を作動させ、他方の細い管を閉じる仕掛けである。

なお、管中を燃焼が進んで未燃ガスを一様に圧縮した

のちにデトネーションが発生すると、初期圧力の高い系でのデトネーションと同じになり、異常に強い爆発圧力を呈することになる。しかし厳密にいうと、圧縮によって圧力と同時に温度も上昇し、未燃ガスの温度上昇はデトネーションの圧力を低下させる方向に働くから、この効果を差引いただけの圧力が生ずることになる。

7. デトネーション波の構造

デトネーションが高速度で伝わる機構、または燃焼からの転移の機構を探るためには、デトネーション波の構造について知らねばならない。一次元水力学的理論から得られる波面構造は図9のようになることが、von Neumann, Zeldovich らにより提唱され、C-J面より先の突起部分を“ノイマンスパイク”と呼ぶ。反応率ゼロの純衝撃波面の圧力はC-J面圧力の約2倍になることが推定されるが、以後 P_{C-J} までの減少過程は反応速度定数が未知である限り、どのような形になるかは定められない。ふつうは反応時間はきわめて短い($10^{-6} \sim 10^{-7}$ sec)ので、このスパイク部分の形状がどうであるかを決定することは難しい。しかし実際にはこの薄い部分の圧力は破壊効果にはあまり影響がなく、実質的に P_{C-J} で定まるものと考えてよいであろう。

最近の研究はデトネーション波の反応帯が決して一次元ではなく、また図9のようなものでもないだろうことを示唆している。波面が周期的に加速と減速をくり返す型のデトネーションをスピンデトネーションと呼ぶ。この現象は限界付近の組成の場合とくに明瞭に観測されるが、精密な測定によるとかなり一般的な現象であることも確かであるし、また安定デトネーションと見える場合ですら反応帯中では週期的変化が生じていることも認められ、反応帯構造が決して一次元的でないことを示している。

その顕著な一例を図10に示す。これはソーロヒン¹²⁾が撮影した $2H_2 + O_2$ のデトネーションの光跡で、円板状容器の中心に生じたデトネーションが円周方向へ同心円的に伝ばしてゆくときの最も強い発光の軌跡を示している。

このような見事な交叉拋物線模様は何故現われるか。詳細は省くが、これはデトネーション波中の反応が縦方向と横方向の両成分をもち、両波の干渉の結果非常に高温($5,000^\circ K$)が生じ急激な反応が起こって、その軌跡が図のようになるものとして説明される。この他、波面の蜂の巣状構造も写真として撮影されており、実際に反応の生じている部分の圧力や温度は一次元理論とは非常に異なるものであることが確かめられている。反応論の上ではこれはきわめて興味深いことであるが、安全工学

の見地からは一次元理論で十分なのでここではこれ以上ふれない。

8. 管内の爆発衝撃の減衰

3節で述べたように管内に全部爆発性ガスが存在しているときは、デトネーションの進行した長さの半分だけが静圧以上にガス流れによる動圧を伴っており、管端の受ける衝撃圧力の持続時間も、デトネーションした長さの長いほど多くなって破壊力も強くなる。ただし波面圧力はデトネーションの伝ば距離にはよらずに一定である。

ところが、管の左側にのみ爆発性ガスが存在し、右側には空気または他の非反応性ガスが存在するときは、デトネーションは境界面で終了し、その後空気中に衝撃波を送り出し、それは距離とともに急速に減衰してゆく。圧力 (p) および速度 (U) の減衰は

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_0} + Kx$$

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{p_0} + K'x$$

で近似的に示される。 p_0 , U_0 は衝撃波初期値, x は距離, K , K' は定数である。

筆者らの実験による減衰係数 K , K' を表5に示す。

この表から $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ 系よりも $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ 系の方が強い衝撃波を出し減衰もおそい。また受ける方のガスは音速の小さいものほど強い衝撃波が発生し減衰は早くなることが分る。また興味あることは、 $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ 系ではデトネーションの圧力 (18.8atm) よりも、界面でアルゴン、または空気中へ送り出される衝撃波の圧力の方が高いという事実である。

このような衝撃波と希薄波の相互作用の状況は特性曲線法¹⁾によって計算することができるし、計算値は実測とも良く合う。

自由空間に広がる爆発衝撃波をしばしば爆風と呼ぶが、経験的に、“同じ爆風圧を与える距離は、爆発量の3乗根に比例する”という近似則が知られている。

爆風の挙動については Kinney¹⁴⁾ その他の著書に詳細な解説がありここでは述べない。

9. 爆発の原因と防止

何が、何故、いつ、どこで、どのように爆発するかは安全の見地から最も重要なことであろう。上に述べたことで、このうちのいくらかは不十分ながら説明してきたつもりであるが、最後に爆発を起こす原因について簡単にふれよう。爆発限界内のガスは燃焼しうるガスである。

図 10 $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ 混合ガス中を中心より円板状に広がるデトネーション波の光跡 (Soloukhin¹²⁾)

表 5 爆発衝撃波の減衰係数¹³⁾

爆発ガス	非反応性ガス	U_0 [m/sec]	p_0 [atm]	K	K'
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ ($p_2 = 29.3$ atm)	アルゴン	1560	29.0	0.1	0.039
	空気	1610	25.0	0.1	0.034
	メタン	1910	19.9	0.09	0.039
$2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ($p_2 = 18.8$ atm)	アルゴン	1400	23.4	0.20	0.085
	空気	1470	20.8	0.15	0.076

この内で特にデトネーションを生じやすい組成領域がある。はじめからこのようなガスを扱うプロセスはまれであり、事故はなんらかの原因で空気が混入してきた場合、またはあらかじめ限界外の酸素を混合するつもりで、混合が均一にならずに部分的に限界内の組成のものができているときに起こる。

発火の原因は管壁のさびが剥がれるときの摩擦、ガスに混入した微粉末、液滴の運んできた静電荷の絶縁部分への蓄積と放電、自然発火性物質の生成、断熱圧縮や衝撃による温度上昇、触媒、光など各種の要因が考えられる。何年間か安全操作をしていても、壁面、可動部分その他状況は刻々変化していることを忘れてはならない。爆発事故というのは多くの場合、きわめてまれな確率でしか起こらない。正常状態では安全な作業も、気付かないうちに条件が変化して危険状態に陥るおそれがある。これは不断の注意によって防止するよりないが、条件変化を知らせる警戒警報装置と、応急処理設備、それに万一の事故に備える防護設備は危険工程に欠くことのできないものであると思う。

応急設備としては、燃焼段階の場合は安全弁、安全窓、火災抑止装置、初期消火装置など各種の方法が考えられるが、デトネーションの段階に入るとその阻止は困難

で、たとえば6節に述べたような伝ば防止策もあるがその適用は特殊な場合に限られるから、耐爆壁、耐爆構造を考えて人命を守る以外にない。

おわりに

ここでは気体のデトネーション波の挙動と性状を中心に爆発を見てきたが、爆発反応の機構とか、爆発性をもつ物質についてはほとんどふれる余裕がなかった¹⁵⁾。

文 献

- 1) G. Rudinger: "Wave Diagrams for Nonsteady Flow in Ducts" D. van Nostrand Co. Inc., New York (1955)
- 2) C. L. Eisen, R. A. Gross & T. J. Rivlin: *Comb. & Flame*, 4, 137 (1960)
- 3) R. B. Morrison: "A Shock-Tube Investigation of Detonative Combustion" Univ. Michigan, Ann Arbor, 1955
- 4) B. Lewis, von Elbe: "Combustion, Flame and Explosions of Gases" 2nd Ed. Academic Press, N. Y., 1961
- 5) R. Wendlandt: *Z. Phys. Chem.*, B 116, 227 (1925)
- 6) Göttingen 大学物理化学研究所の Dr. Pusch の私信より, cf. W. Pusch, H. G. Wagner, *Combustion and Flame*, 6, 157 (1962)
- 7) P. Laffitte: *Compt. rend.*, 189, 146 (1934)
- 8) S. M. Kogarko, Ya. B. Zeldovich: *Doklady Akad. Nauk SSSR*, 83, 533 (1948)
- 9) W. Payman, C. F. Shepherd: *Proc. Roy. Soc.*, A 158, 348 (1937)
- 10) 正田: "燃焼より爆轟への転移", 化学と工業, 18, No. 4, 451 (1963)
- 11) 正田, 米田: 日本化学会 19 年会予稿集 V (1966)
- 12) R. I. Soloukhin: *Soviet Phys. USPEKHI*, 8, 523 (1964)
- 13) 山本清: 東大工修士論文 (未公表)
- 14) G. F. Kinney: "Explosive Shocks in Air", MacMillan Co., N. Y., (1962)
- 15) 参考, 正田, "爆発" コロナ社 (1965); "衝撃波発火": 安全工学, 3, 169 (1964)
- 16) 文献 (2): その他 "Kinetics, Equilibria and Performance of High Temperature Systems", Butterworths, London, (1960) など

石 油 精 製 工 場 の 安 全*

木 下 次 郎**

はじめに

最近、化学工場および危険物や高圧ガスの貯蔵・輸送・取り扱いに関連する火災・爆発事故が相次いで発生したため、世論の関心は、それらの防災に注目されるようになってきた。災害原因については多くの要因があげられるが、共通した根本原因として、いづれもが管理の隙間があったか、安全工学の基礎知識の欠如によるものと言えよう。天災に対しても十分な検討がなされ対策がたてられていれば、被害を最小限に止めることが可能である。

なお、可燃性液体の取り扱いに関連する工場公害につ

いても社会問題となってきたが、産業の発展と住民の健康保持、健全な社会生活の保障は必須の条件であり、工場に働く従業員の労働衛生の立場からも、Plant Lay Out の段階から慎重に検討されるべきであり、生産性にマッチした技術対策が必ずやうちたてられるはずである。

産業の近代化とともに、石油精製工業においてもいろいろな面で技術的な変革が行なわれ、装置・設備の大型化、オートメシンの徹底した採用によって、安全管理の面においても高度の技術が要求されるようになってきた。

編集委員会から与えられた命題を限られた紙面に意を尽くすことは、はなはだむずかしい。したがって詳細については安全工学 Vol. 1 (1963)~Vol. 4 (1965) に筆者

* 昭和 41 年 3 月 23 日 受理

** Jiro Kinoshita 日本石油精製(株)根岸製油所