

# 火災, 爆発の防止と燃焼現象

石田博樹

長岡工業高等専門学校 名誉教授

## 1. 気体、液体による火災、爆発の発生条件

燃焼 (Deflagration) = 多量の熱と光の発生を伴う酸化現象

爆轟 (Detonation) = 衝撃波を伴う火炎面の伝播現象  
(爆発: Explosion とは異なる。)  
「爆発」は学問的用語ではない。

火炎面の前後にて、温度、圧力、密度が 連続 → 燃焼、  
不連続 → 爆轟。

- (1) 可燃範囲濃度の混合気体が形成
  - \* 燃焼限界 = 爆発限界 (上限界濃度と下限界濃度あり)
  - \* 爆轟の濃度範囲 < 燃焼の濃度範囲
- (2) 着火に必要な十分な熱エネルギーが存在 (火花, 光, 熱面, 高温ガス, 等)
- (3) 発生した火炎からの熱を吸収する物が近くに存在しない

## 2. 火災、爆発の防止の対策

- (1) 可燃範囲濃度の混合気体の形成を防止
- (2) 可燃物の集積、漏洩、拡散を防止
- (3) 着火の熱源を抑制し、また暴走反応を制御、防止

最小着火エネルギー(火花), 火花着火における消炎距離の概念,  
高温固体や高温ガスの隔離や除去。

### 3. 火災、爆発に関連する研究課題

#### 3-1 気体の火災、爆発

##### (1) 混合気の可燃範囲濃度に影響する因子

\* 下限界濃度への圧力, 温度の影響は小さい。 \* 熱損失による消炎距離が存在。

\* 不活性ガスの存在は, 可燃濃度範囲を狭める。

\* 下限界濃度における発熱量は一定 (Burgess-Wheelerの法則)

燃焼熱  $Q$  (Kcal / mol)  $\times$  下限界濃度  $L$  (vol.%) = 1040-60 (for 炭化水素)

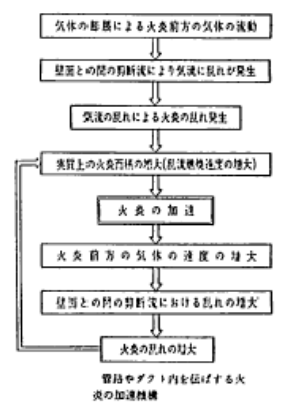
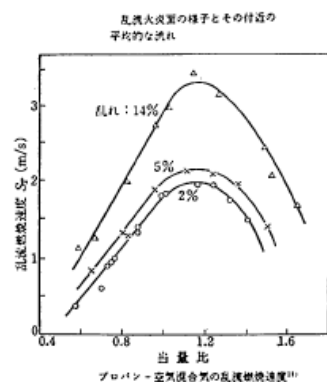
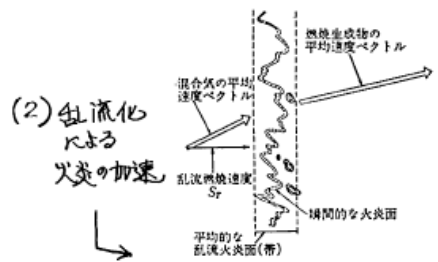
よって、下限界濃度の混合気の火炎温度は、ほぼ一定: 約 1300 °C

\* 混合気体の成分間に反応がない場合 (Le Chatelier の法則)

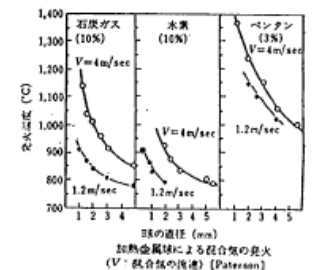
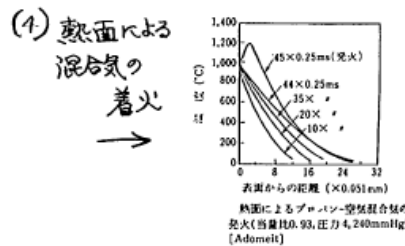
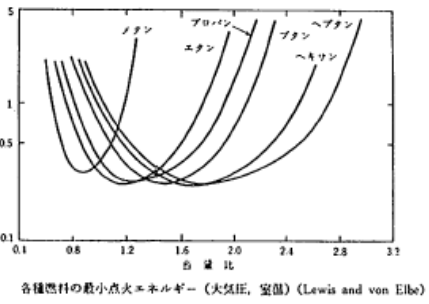
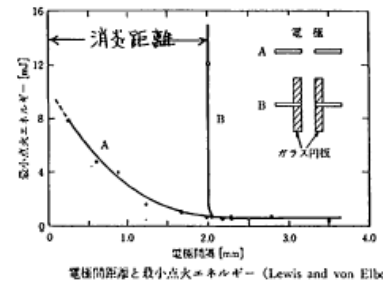
混合気の可燃下限界濃度 ( $L$  vol.%):  $L=100 / \sum_i (N_i / L_i)$

(  $N_i$  = 成分 $i$ の体積分率 (vol.%),  $L_i$  = 成分 $i$ の下限界濃度 (vol.%) )

\* 混合気体の成分間に反応がある場合は燃焼抑制作用がある。  
(ハロゲン, アルカリ金属等を混合した時)



(3) 消炎距離と最小点火エネルギー



## (2) 可燃混合気中の火炎の挙動と伝播速度

\* **燃焼速度** (Burning Rate) : 未燃ガスが火炎面に垂直に流入する速度  
通常 **30 ~ 50 cm/s**

\* **火炎速度** (Flame Speed) : 静止空間に対する火炎面の移動速度  
通常 **1 ~ 20 m/s**

## (3) 流れ場における火炎の消炎、吹き飛び

\* 伝播火炎の構造 (予熱領域と反応領域の存在)

\* 予混合バーナ火炎の安定化: **燃焼速度と混合気流速の釣り合い**で決まる。

\* **限界速度勾配**の概念:

未燃焼ガスの**管壁における流速勾配**が一定値以上では火炎が

**吹き飛び (Blow off)**, 一定値以下では**逆火 (Flash back)**が起きる。

円管バーナ内の混合気流れを**ポアズイユ流れ**とすると **限界速度勾配 (g)**:

$$g = 4 (U / R) = (4 / \pi)(Q / R^3)$$

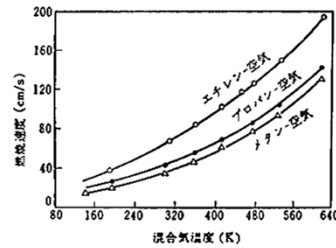
U : 混合気の平均流速, Q : 混合気の体積流量 (cm<sup>3</sup>/s)

R : バーナの半径 (cm)

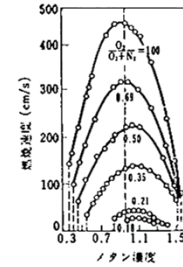
# (1) 可燃性混合気の燃焼速度

1 気圧, 25°C, 上向き伝ばのときの空気中爆発限界  
(可燃ガスの vol %) (19)

物質	下限界	上限界	物質	下限界	上限界
水	4.0	75	キ ュ メ ン	0.9	6.5
一酸化炭素 (混)	12.5	74	シクロヘキサン	1.3	7.8
メタン	5.0	15.0	メチルシクロヘキサン	1.1	6.7
エタン	3.0	12.4	メチルアルコール	6.7	36 (60°C)
プロパン	2.1	9.5	エチルアルコール	3.3	19 (60°C)
ブタン	1.8	8.4	ジメチルエーテル	3.4	27
ヘキサン	1.2	7.4	ジビニルエーテル	1.7	27
エチレン	2.7	36	アセトアルデヒド	4.0	36
アセチレン	2.5	100 (81)	アセトン	2.6	13
プロピレン	2.0	11	メチルエチルケトン	1.9	10
ブテン-1	1.6	10	硫化水素	4.0	44
ブテン-2	1.7	9.7	二酸化炭素	1.3	50
1,3-ブタジエン	2.0	12	アンモニア	15	28
ベンゼン	1.3	7.9	ヒドラジン	4.7	109
トルエン	1.2	7.1	(ガソリン)	1.3	7.1
キシレン (o,m)	1.1	6.4	塩化ビニルモノマー	4	21.7
キシレン (p)	1.1	6.6	酸化エチレン	3	100 (80)



最大燃焼速度に対する混合気温度の影響  
(Dugger, Heime)



メタンの燃焼速度  
(Singer, Heime)

濃度は混合気 (理論混合比に対する割合) で示してある。1 気圧常温

炭化水素-空気混合気の大燃焼速度 (Gerstein, Levine, Wong)

燃料	最大燃焼速度 (cm/s)	そのときの燃料濃度 (%)	燃料	最大燃焼速度 (cm/s)	そのときの燃料濃度 (%)
メタン	33.8	9.96	エチレン	68.3	7.40
エタン	40.1	6.28	プロピレン	43.8	5.04
プロパン	39.0	4.54	1-ブテン	43.2	3.87
ブタン	37.9	3.52	1-ペンテン	42.6	3.07
ペンタン	38.5	2.92	1-ヘキセン	42.1	2.67
ヘキサン	38.5	2.51	2-メチル-1-プロペン	37.5	3.83
ヘプタン	38.6	2.26	2-メチル-1-ブチン	39.0	3.12
2-メチル-プロパン	34.9	3.48	プロピレン	69.9	5.86
2-2-ジメチル-プロパン	33.3	2.85	1-ブテン	58.1	4.36
2-メチル-ブタン	36.6	2.89	1-ペンテン	52.9	3.51
2-2-ジメチル-ブタン	35.7	2.43	1-ヘキセン	48.5	2.97
2-3-ジメチル-ブタン	36.3	2.45	シクロヘキサン	38.7	2.65
2-2-3-トリメチル-ブタン	35.9	2.15	ベンゼン	40.7	3.34

#### (4) 伝播する火炎に対する障害物の影響

\* 火炎面の増大(乱れの増大) → 反応速度の増加 → 爆轟 (Detonation)

\* 管内における燃焼から爆轟への転移までの助走距離:  
管の口径, 管壁の粗さ, 管内の障害物などの影響が大きい。

可燃混合気の爆轟速度: 2000~3000 m/s

#### (5) 火炎の温度

\* 火炎が到達できる最高温度は混合気の基礎定数のひとつ。

\* 燃焼による発熱量が損失なく各生成物に比熱に応じて配分されたときに  
最高温度となり、これを断熱火炎温度 (Adiabatic Flame Temperature) と呼ぶ。

燃焼下限界における火炎温度 (燃焼温度) は、ほぼ一定: 約 1300 °C

\* 拡散火炎の温度は予混合火炎よりも低く、燃料の種類によらず 1400~1500°C

## 3-2 液体の火災、爆発

### (1) 液面上の燃焼と火炎の拡がり

- \* 液面燃焼： 燃焼速度(燃料消費速度)への影響因子：  
容器壁からの熱伝導, 火炎からの熱放射, 周囲の気流など。
- \* 液面上の火炎の拡がり速度への影響因子：  
燃料の温度(引火温度との比較), 容器の大きさや形状,  
周囲の気流など。

### (2) 液体燃料の着火と引火特性

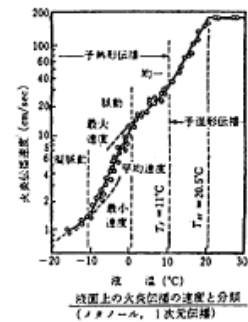
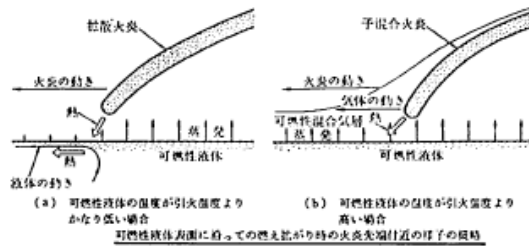
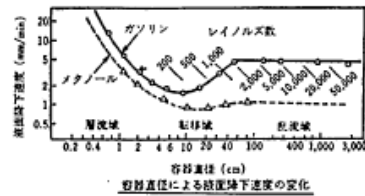
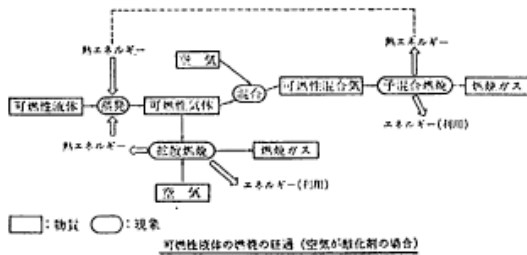
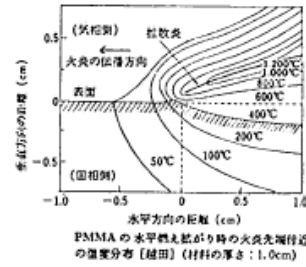
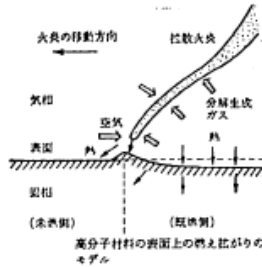
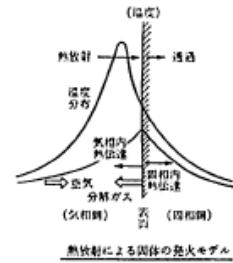
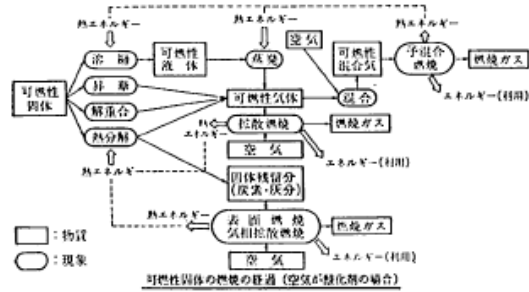
- \* 引火温度 (Flash point) : 液体の表面近傍に小さな口火を接近させた時に着火する最低の液温(上部引火点と下部引火点がある)。
- \* 燃焼温度 (Fire Point) : 着火した後に火炎が自力で存続できる最低の液温。  
引火温度よりもわずかに高い。
- \* 着火温度 (Ignition point) : 液体が高温雰囲気中で着火できる最低温度

### (3) 蒸気雲爆発(Fire Ball)の解明

- \* 流出し滞留した可燃性混合気の着火。
- \* 圧力波と放射熱による被害



### (5) 固体と液体の燃焼過程



### 3-3 固体の火災、爆発

#### (1)可燃固体の着火に影響を与える因子:

\* 外部から入る着火エネルギー源(放射, 高温気流)の大きさ, 固体の温度伝導率, 発熱と放熱のつりあい(熱発火理論), 周囲の酸化剤の濃度と固体内拡散, 燃料成分の拡散と混合, 燃料の蒸発(消耗)

#### (2) 材料の難燃化

#### (3) 固体表面上の火炎の拡がり

\* 支配的な伝熱モード(気相と固相), 周囲気流の影響, 重力の影響, 周囲からの熱放射の効果

#### (4) 粉塵の着火と爆発

\* 可燃性の粉塵が適切な濃度で空気中に浮遊し, 熱エネルギー源が存在する時。

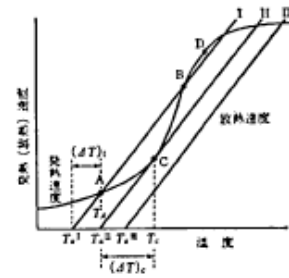
\* 金属粉, 農産加工品の粉塵, 繊維類の粉塵, 有機無機化学薬品の粉塵のすべてが爆発可能。

## (6) 可燃物の熱発火

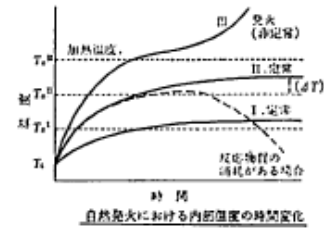
温度上昇は化学反応による発熱の速度と系外への放熱の速度の差によって起こるから、反応速度の温度依存性はアレニウス形、放熱はニュートンの冷却則によるとし、また簡単のため系内の温度は一様と仮定すると、次式が得られる。

$$c\rho V(dT/dt) = QC_0^m k_0 \exp(-E/RT) - \alpha S(T - T_0)$$

ここに、 $c, \rho$  および  $V$  は、それぞれ混合系の比熱、密度および容積、 $T$  は系内の平均温度、 $t$  は時間、 $C_0^m$  は反応物質の濃度 ( $m$  は反応次数)、 $Q$  は発熱量、 $k_0$  と  $E$  はそれぞれ反応の前指数因子と活性化エネルギー、 $R$  はガス定数、 $\alpha$  は表面における熱伝達率、 $S$  は表面積、さらに  $T_0$  は外部(加熱)温度を示す。



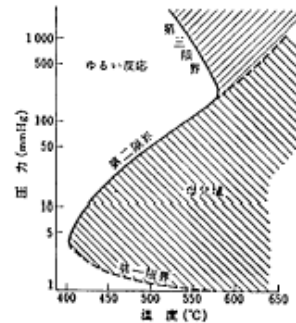
自然発火における発熱と放熱の関係



自然発火における内部温度の時間変化

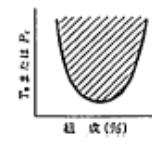
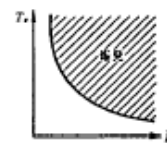
Semenov<sup>(1)</sup> の発火限界式  $P_c$  と  $T_0$  の関係を与える。

図2-2はこの関係を模式的に示すもので、温度の高いほど限界圧力は低くなること、逆に圧力が高いほど発火点の低いこと、組成により発火の限界圧力、限界温度が変わることを示す。



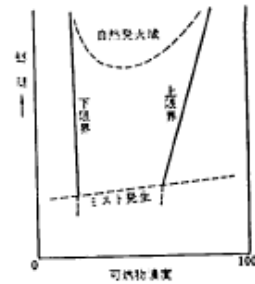
2H<sub>2</sub>O-O<sub>2</sub> の発火限界  
(KCl 被覆, 7.4cm 球形容器)

By Hinshelwood x Semenov  
(1957年ノーベル化学賞)



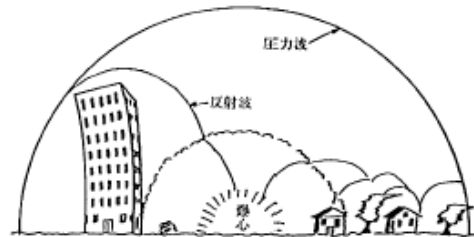
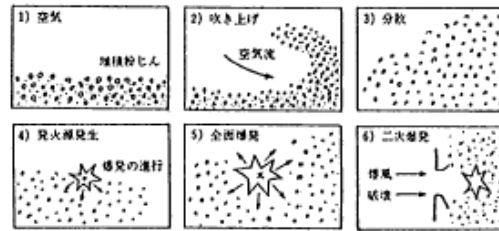
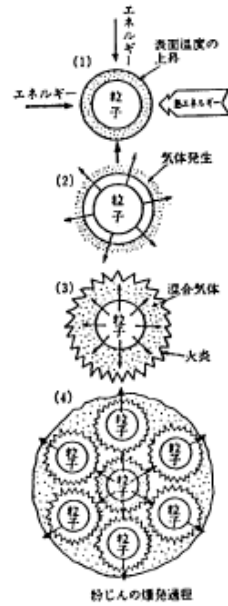
発火の限界

$$\ln P_c = \frac{A}{T_0} + \text{Const.}$$

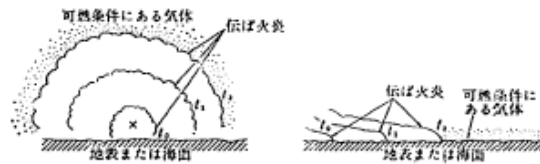


発火限界と温度の関係

# (7) 粉以爆発, 蒸気爆発



(b) それに続いて、爆心上方にファイヤボールが発生した状態  
大量の可燃性物質が溜え、爆発が起こった場合の圧力波とファイヤボール



(a) 可燃条件を満足する領域が上面に広がった場合の火炎伝ば  
可燃条件を満足する領域の広がり方による火炎伝ばの様子の違い

(b) 地表や海面上に可燃層が形成された場合の火炎伝ば

#### 4. 日常生活における火災、爆発事故の防止

1. 常に「事故現場に学ぶ」姿勢が大切。
2. 事故には多くの因子が連携していることの認識が大切。
3. 事故現場の様子と原因を詳細に記録に残す。
4. 燃焼現象と火災爆発の基礎知識の普及が大切。