

建築防火工学

野口貴文

燃焼と火炎性状(1)

燃焼現象の概要

■ 燃焼現象

- 強い発熱を伴う化学反応が高速で起きる現象
- 発光を伴うことが多い
- 発熱作用による高温 \Leftrightarrow 大きな反応速度
- 可燃物が酸素により酸化
- 可燃物より発生した可燃性気体が酸素により酸化
- 燃焼の3要素
 - 可燃物(酸化されるもの)
 - 酸化剤(酸化作用を起こす化学種、酸素)
 - 着火源(燃焼反応を始めるのに十分なエネルギーを与えるもの、発火源、炎・高温物体・電気火花)

■ 火

- 燃焼現象の起きているところ
 - 炎(flame) 気相
 - 赤熱部分(glowing zone) 炎を伴わないで燃える炭、たばこ

燃焼現象の概要

■ 燃焼の分類 (物理的な条件の違いから)

- 反応物質の組み合わせによる分類
 - 可燃物と酸化剤(空気)による燃焼
 - 分解燃焼
 - 複合燃焼(分解燃焼生成物と雰囲気との間の反応)
- 燃焼反応が起こる相(phase)による分類
 - 固相燃焼
 - 液相燃焼
 - 気相燃焼(炎による場合)
 - 固液界面燃焼
 - 液気界面燃焼
 - 気固界面燃焼(表面燃焼:炭の燃焼、燻焼)

燃焼現象の概要

■ 燃焼の分類

- 可燃物の初期状態による分類
 - 気体の燃焼(均一燃焼) (homogeneous combustion)
 - 液体の燃焼(不均一燃焼) (heterogeneous combustion)
 - 固体の燃焼(不均一燃焼) (heterogeneous combustion)
- 可燃物と酸化剤の混合の仕方による分類
 - 予混合燃焼
 - 予め可燃物と酸化剤が混合し可燃性混合物(混合気)が形成されている状態で燃焼
 - ガス爆発
 - 拡散燃焼
 - 燃焼反応の反応帯に向かって可燃物と酸化剤が互いに反対側から拡散しながら供給される状態で燃焼
 - 火災

燃焼現象の概要

■ 燃焼の分類

- 炎の移動の有無による分類
 - 定在火炎
 - 周囲空間に対して、相対的にほぼ静止している火炎
 - 例: ガスコンロの炎
 - 伝播火炎
 - 移動する火炎
 - 火炎伝播 : 予混合火炎 (Premixed Flame) の移動
 - 燃え拡がり : 拡散火炎 (Diffusion Flame) の移動

燃焼現象の概要

■ 燃焼反応と発熱

- 酸化反応による主な発熱成分となる元素
 - 水素 H
$$\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$$
 - 炭素 C
$$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$$
$$\text{C} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} \text{ (不完全燃焼時)}, \text{CO} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$$
 - 硫黄 S
$$\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$$
- 燃焼反応の中間生成物:
 - 不安定な物質(原子や活性なラジカル)
- 完全燃焼した最終生成物:
 - 安定な化学物質(CO₂やH₂O等)
 - 単純化した総括反応式と発熱を基本として考える

燃焼現象の概要

■ 燃焼反応と発熱

- 物質の燃焼時に必要な酸素量
 - $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d + (a+b/4-c/2)\text{O}_2 \rightarrow a\text{CO}_2 + b/2\text{H}_2\text{O} + d/2\text{N}_2$
 - a, b, c, d: 可燃物1kgに含まれるモル数
 - $a=(w_C/12) \times 10^3$, $b=(w_H/1) \times 10^3$, $c=(w_O/16) \times 10^3$, $d=(w_N/14) \times 10^3$
 - 可燃物1kgの完全燃焼に必要な酸素量
 - $(w_C/12 + w_H/4 - w_O/32) \times 32\text{kg}$
 - w_C, w_H, w_O, w_N : C, H, O, Nの質量分率(総和が1)
 - 木材の平均的な元素組成(質量分率)
 - $w_C=0.495$, $w_H=0.064$, $w_O=0.442$
 - 必要酸素量 43mol、1.38kg
 - 必要空気量 5.9kg、4.6m³(空気中の酸素の質量分率0.233)

燃焼現象の概要

■ 燃焼反応による発熱

- 反応物質が生成物になるときの減少した化学エネルギーを熱として放出
- 発熱量
 - 25℃(初期状態)の反応物質を反応後、初期温度に戻したときに外部に取り出せる熱量
 - H₂Oを含む物質の発熱量の考え方
 - 高発熱量
 - 初期温度まで冷え、すべてのH₂Oが凝縮して液体状態になったときにはき出す熱量を含む発熱量
 - 低発熱量
 - H₂Oは水蒸気の状態にあるとしたときの発熱量
- 火災
 - 酸化剤が空気、定圧で燃焼するときのエンタルピー(圧力一定の条件で系がもつエネルギー)変化を使う
 - 低発熱量

燃焼現象の概要

■ 可燃物の低発熱量

可燃物	単位質量当たりの低発熱量(kJ/g)		
	可燃物	O ₂	空気
水素	119.9	15.1	3.52
炭素	32.8	12.3	2.87
ポリエチレン	43.3	12.7	2.95
ポリ塩化ビニル	16.4	12.8	2.99
木材(楓)	17.8	12.5	2.91
新聞紙	18.4	13.4	3.08
		13.1	

燃焼現象の概要

■ 予混合火炎(Premixed Flame)の構造

- ガスコンロ、ガソリンエンジン
- 未燃混合気が流入
 - 燃焼ガス(熱膨張)が流出(流入速度より高速)
- 火炎帯(反応帯+予熱帯)
 - 反応帯: 燃焼反応が盛んに発生
 - 予熱帯: 反応帯で発生した熱により未燃混合気の温度上昇
 - 火炎帯厚み 1mm以内

燃焼現象の概要

■ 予混合火炎(Premixed Flame)の構造

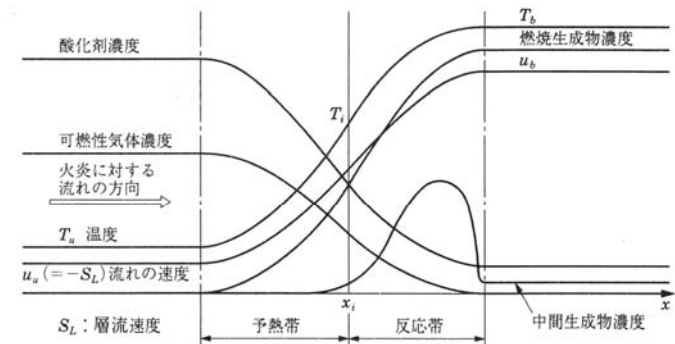


図 4.1 予混合火炎の構造の概略³⁾
(酸化剤(酸化作用をもつ化学種)がいくぶん過剰な未燃混合気の場合)

燃焼現象の概要

■ 予混合火炎 (Premixed Flame) 前後の流れ場

- 燃焼速度 (層流燃焼速度)
 - 火炎の温度・厚み、未燃混合気の組成・温度・圧力の影響
 - 未燃混合気の流入速度の火炎面に垂直方向の成分
 - 乱流火炎の乱流燃焼速度は、火炎面の複雑さにより、層流燃焼速度よりはるかに大きい値となる。

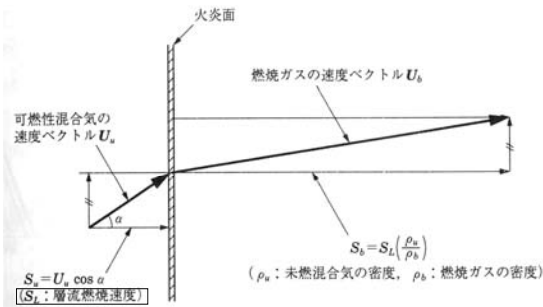


図 4.2 未燃混合気の流れに対し傾いた予混合火炎前後の流れ場

燃焼現象の概要

■ 予混合火炎 (Premixed Flame) の燃焼

- 理論混合気
 - 可燃性気体と酸化剤とが過不足なく完全燃焼するような組成をもつ未燃混合気
- 可燃性混合気
 - 可燃範囲 (予混合火炎が伝播しうる組成の範囲) にある混合気
- 可燃下限界
 - 可燃性気体の濃度が理論混合気での濃度より小さい側 (希薄側、空気過剰側) での限界 (半分程度)
- 可燃上限界
 - 大きい側 (過剰側、空気不足側) での限界 (1.5~3倍程度)
- 当量比 (可燃性気体と酸化剤の混合割合を表す指標)
 - $\phi = (\text{可燃性気体濃度} / \text{酸化剤濃度})_{\text{実際の混合気}} / (\text{可燃性気体濃度} / \text{酸化剤濃度})_{\text{理論混合気}}$
 - $\phi > 1$: 可燃性気体が過剰、 $\phi < 1$: 酸化剤が過剰

燃焼現象の概要

■ 予混合火炎 (Premixed Flame) の特徴

- 固体 (壁) に対する熱損失大
 - 狭い隙間を通り過ぎることが出来ない
 - 混合気の流れる管の途中に金網・小孔を設置して逆火を防止
- 炭化水素系の可燃物の燃焼
 - 空気過剰 紫がかった青色の不輝炎
 - 燃料過剰 緑を帯びた青色の不輝炎

燃焼現象の概要

■ 拡散火炎 (Diffusion Flame)

- 炎をあげて燃える火災
- 反応帯
 - 酸素と可燃性気体が過不足なく供給される燃焼反応
- 拡散層
 - 反応帯の外側の濃度変化の生じている領域

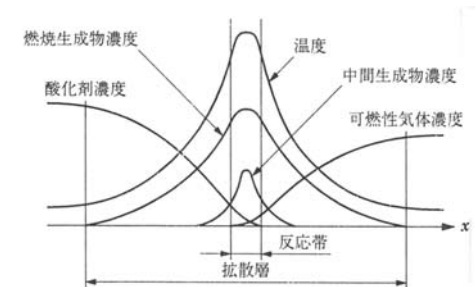


図 4.5 拡散火炎の構造の概略^{*)}
(通常、火炎面に平行方向の流れが付随)

燃焼現象の概要

■ 拡散火炎 (Diffusion Flame) の構造 (バーナー)

- 火炎の付け根付近
 - 濃度勾配が大
 - 火炎に反応物質が多く供給され発熱速度も大
- 下流側
 - 濃度勾配が小
 - 熱発生量も小であるが、上流から運ばれる熱の影響で比較的高温状態

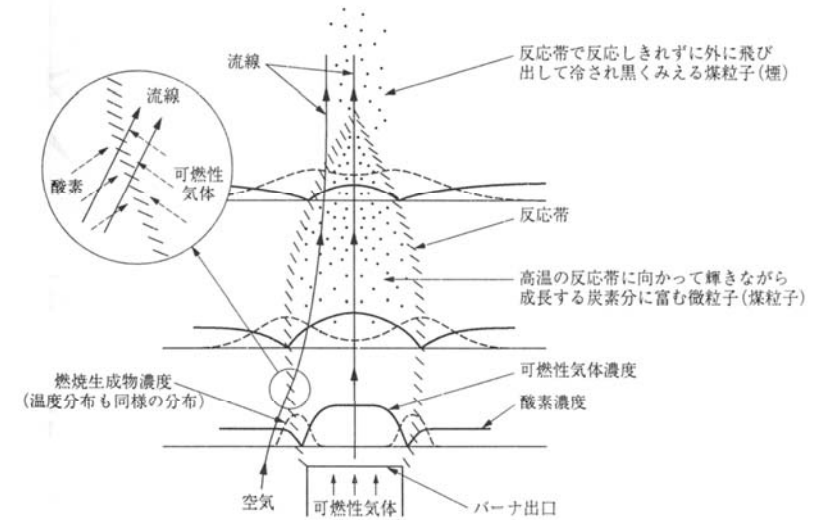


図 4.6 バーナー出口上に形成された、炭化水素系可燃性気体による拡散火炎の構造 (温度分布は燃焼生成物の分布形状と類似)

燃焼現象の概要

- 炭化水素系の気体の拡散火炎 (Diffusion Flame)
 - 炭化水素系の気体が、炎への到達までに酸素の無い所を長距離通過する際に
 - 気相中で熱分解
 - 炭素分の遊離
 - 微粒子(煤粒子)の生成
 - 橙色・黄色の輝き、輻射
 - 反応帯で酸素と反応して二酸化炭素・一酸化炭素
 - 大きな粒子
 - 反応しきれないで炎の外で冷却され黒い微粒子(黒煙、煤)

燃焼現象の概要

- 着火の概念
 - 着火(発火、点火) (Ignition)
 - 燃焼反応が開始して持続する状態に至ること
 - 化学反応による発熱と周囲への放熱の釣り合いに基づく(熱着火理論)
 - 発熱 (heat generation) > 放熱 (heat dissipation) で着火
 - 着火温度 (Ignition Temperature, Ignition Point)
 - 常に発熱が放熱を上回る限界の周囲温度
 - 最低着火温度 (一般的には、着火温度) (Spontaneous Ignition Temperature)
 - 自然発火に至るまでの時間遅れを考慮した着火温度
 - 容器が大→着火温度低下 (体積と表面積の関係)
 - 粉末・多孔質体→表面積増加→反応が容易→着火温度の低下

燃焼現象の概要

■ 熱着火理論における発熱と放熱の関係

– 容器に入れた可燃性混合気を外から加熱

- q_1 : 容器内の混合気全体の発熱速度(曲線)
- q_2 : 壁を通しての放熱速度(直線)
- $T_{01} < T_{02} < T_{03}$: 壁温
- T_{02} : 着火温度

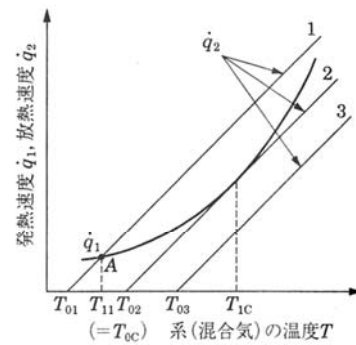


図 4.7 熱着火理論における発熱と放熱の関係⁹⁾
(3本の直線は左から、壁面温度が T_{01} , T_{02} , T_{03} , のときの放熱速度を表す)

燃焼現象の概要

■ 着火温度と引火温度

– 引火 (Pilot Ignition)

- 可燃性液体・可燃性固体から発生して広がった可燃性気体と空気が混合してできた可燃混合気に着火源を用いて着火すること

– 引火温度(引火点) (Flash Temperature/Point)

- 可燃範囲の下限の混合気ができる温度

燃焼現象の概要

可燃性気体・液体	着火温度 (°C)	引火温度 (°C)	可燃性固体	着火温度 (°C)	引火温度 (°C)
水素	500		ポリエチレン	430	340
一酸化炭素	609		ポリプロピレン	440	410
メタン	632		ポリ塩化ビニル	500	530
プロパン	504		ポリメチルメタクリレート	520	300
n-ブタン	403	-72	赤松	430	263
n-ヘプタン	247	-4	ケヤキ	426	264
メタノール	385	11	ツガ	455	253

燃焼現象の概要

■ 気体の燃焼

– ガス火災

- 定義: 可燃性気体が継続的に炎を挙げて燃える火災
- 代表例: 破れた配管から可燃性気体が吹き出しながら燃える場合
- 漏洩によって形成される可燃性混合気の場合、
 - 定圧下の燃焼→6~7倍の体積膨張
 - 周囲の壁・床・天井による拘束
 - 圧力上昇
 - 窓ガラス、壁面の破壊

燃焼現象の概要

■ 固体の燃焼

－ 高分子固体の燃焼

- 加熱→熱分解→溶融→昇華→可燃性気体の発生
- 熱分解時に炭素分に富む黒褐色の炭化層の形成、不燃物→灰

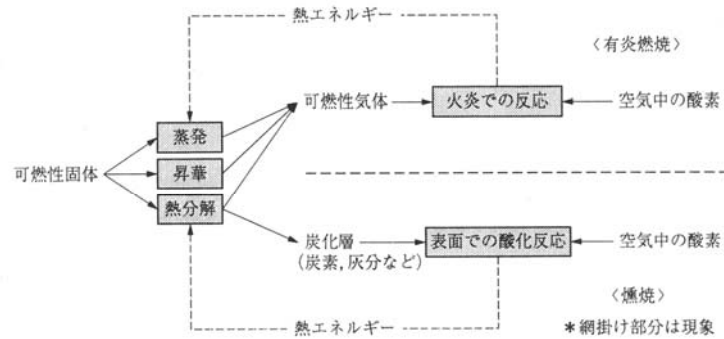


図 4.9 可燃性固体（高分子固体）の単純化した燃焼の過程

燃焼現象の概要

■ 木材における着火、引火、無炎着火

- 周囲を徐々に加熱→無炎着火：炭化層と酸素との表面反応
- 燻焼→引火：着火源を木材表面に接近→発炎着火

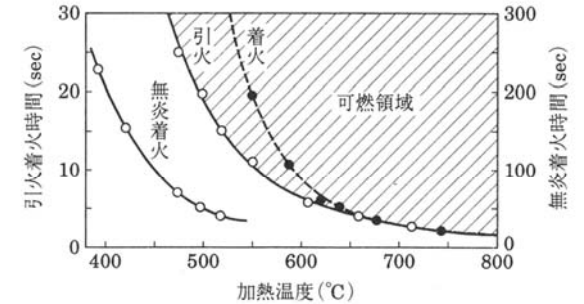


図 4.8 木材における着火、引火、無炎着火の関係¹⁰⁾

燃焼現象の概要

■ 可燃性固体の有炎燃焼による燃え広がり

- － 火炎から固体への熱移動の影響
 - 対流熱伝達：炎付近の気体の流れ場に依存
 - 輻射熱伝達
- － 固体内部での熱移動の影響
- － 熱分解反応の影響
 - 火炎に覆われれば酸素のない状態で起きる熱分解反応は吸熱反応、熱分解領域の温度変化は小
- － 可燃性気体の拡散の影響
- － 火炎での燃焼反応の影響

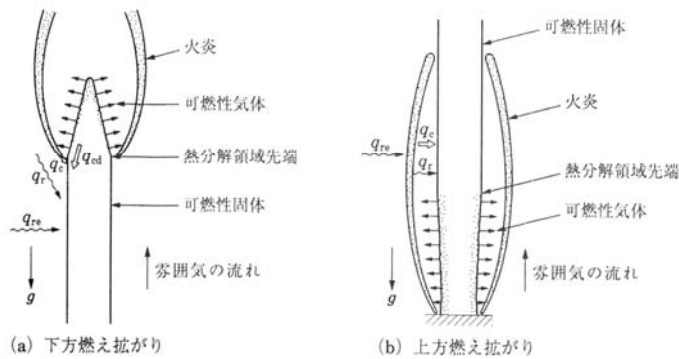
燃焼現象の概要

■ 可燃性固体の有炎燃焼による燃え広がり

- － 下方燃え広がり
 - 炎先端の動きが気流の方向と逆→未燃部分に伝熱しにくい
 - 燃え広がり速度は一定で大きくない
 - － 物体が薄い場合：厚さに反比例
 - － 物体が厚くなると一定速度
 - － 木材：厚い炭化層の形成→燃え広がり不可
 - 大きな対向風→炎の先端が不安定化→吹き消え
- － 上方燃え広がり
 - 対流熱伝達の促進→未燃部分の加熱促進
 - 燃え広がり速度は大
 - 熱分解領域の幅大、可燃性気体の発生大、火炎長大、全発熱速度大
- － 熱可塑性樹脂
 - 高温で溶融→流動・滴下→燃え広がりに影響

燃焼現象の概要

■ 可燃性固体の有炎燃焼による燃え拡がり



q_e : 気体から固体へ対流により流入する熱, q_{cd} : 固体内を伝導により移動する熱
 q_r : 火炎から固体へ輻射により流入する熱, q_{re} : 外部熱源から固体へ輻射により流入する熱

図 4.10 可燃性固体表面に沿って自然対流下で燃え拡がるときの火炎付近の様子¹¹⁾

燃焼現象の概要

■ 燻焼

- 熱分解による炭化層の形成と炭化層・空気間の表面反応とが隣り合わせで同時に進みながら炎を出さずに燃える現象
- 可燃性の気体成分は反応せず、外部に流出→不完全燃焼
 - 粉末、多孔質体など表面積が大きく熱が逃げにくいもので発生
 - 有炎燃焼が始まるにはやや不足する加熱を受ける場合に発生
 - 酸素が不足している状態で発生
 - 可燃性気体の発生が不十分な場合に発生
- 熱分解反応: 300℃前後から開始
 - 発生する高沸点の気体成分(タール分)→冷却・凝縮→小粒子の白煙を発生
 - 一酸化炭素の発生
- 表面反応の箇所: 600~800℃
 - 一酸化炭素の発生
- 灰分(カルシウム): 表面反応の触媒作用

燃焼現象の概要

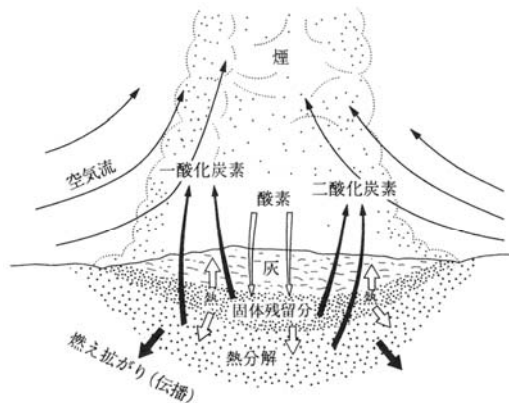


図 4.12 燻焼が起きている付近の様子¹³⁾

燃焼現象の概要

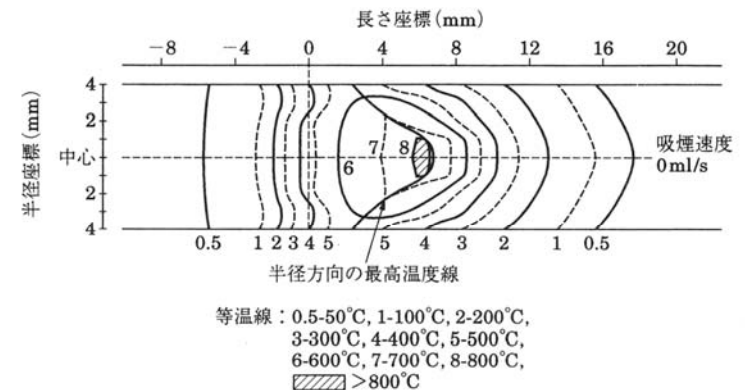


図 4.13 吸煙していない自然燃焼時のタバコ内の温度分布の例¹⁴⁾

燃焼現象の概要

■ 液体の燃焼

- 気化して発生した可燃性液体の蒸気と空気(空気・蒸気混合気)とで炎を形成
- 可燃性範囲の温度依存性
- 可燃性固体よりも低温で気化
- 燃焼が始まると拡大しやすい
 - 火炎に覆われた部分
 - 火炎からの熱を受けて液温が沸点近くまで上昇
 - 蒸発しながら燃焼
- 通常の液体では、気液界面での燃焼反応による表面燃焼は起きない

燃焼現象の概要

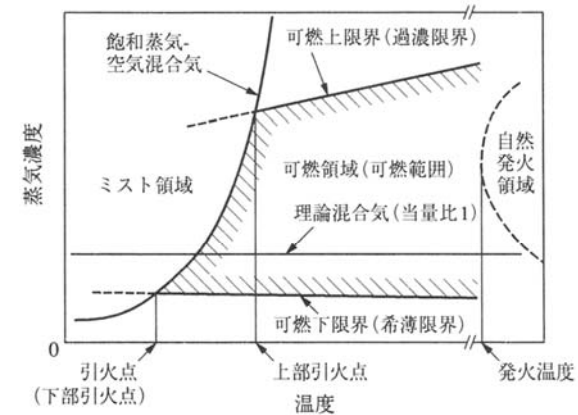


図 4.14 可燃性液体の蒸気濃度と可燃範囲, 引火点等の関係

消火の基礎

■ 消火

- 燃焼継続に必要な3要素のどれかを取り去る
 - 可燃物、空気(酸化剤)、高温状態

■ 消火剤

- 水(冷却)
- 不活性ガス(希釈)
- ハロン系ガス(ラジカルの補捉・失活)(オゾン層の破壊)
- 粉末消火剤(噴出用には気体も使用)(表面被覆)(ラジカルの補捉・失活)
- 泡消火剤(油火災に適)(熱供給の遮断)

消火の基礎

■ 可燃物の除去

- 可燃性ガスの供給阻止(ガス火災)
- 未燃可燃物の破壊・除去(林野火災、都市火災)
- 可燃性気体の発生抑制
 - 放水→冷却して温度を下げ可燃性気体の発生を抑制
- 粉末消火剤
 - ガラス質物質の生成→表面被覆
- 強風
 - 可燃性気体を炎とともに吹き飛ばし除去

消火の基礎

■ 空気(酸化剤)の除去

- 窒息消火
 - 火災空間の周囲を閉じて新たな空気の供給を遮断、狭い空間で有効
- 拡散火炎の場合
 - 酸素濃度が10数%で消炎
- 不活性気体で希釈
 - 酸素濃度の低下
 - 加熱すべき気体量の増加→火炎温度の低下
- 高温状態の除去と密接な関係

消火の基礎

■ 高温状態の除去

- 希釈方法(前述)
- 熱を積極的かつ集中的に奪う方法
 - 大量の冷たい不燃性の微粒子を火炎にかける方法
 - 蒸発潜熱を利用する方法
 - 粒径の小さな水滴群(ウォーターミスト)の蒸発

消火の基礎

■ ラジカルの失速

- ハロン系消火剤
 - ハロゲン元素(塩素、フッ素、臭素)を含有
 - ラジカルと反応→燃焼反応の継続に必要な連鎖反応を抑制
 - ラジカル
 - 最外殻に(原子価)に不対電子を持つ化学種
 - 不対電子のために、非ラジカル種(電子が全て対になっている)に比べて高い自由エネルギーを持っており、はるかに反応性が高い
- 粉末消火剤
 - ナトリウム、アンモニウムイオン
- ハロゲン含有
 - 難燃薬剤(可燃性物質の難燃化)
 - 難燃性可燃物質

消火の基礎

■ ガス系消火剤の消火性能

- ピーク濃度
 - 可燃条件にある気体に、他の物質を添加すると、燃焼範囲が変化する
 - 添加気体の量がある値以上→可燃範囲の消滅
 - 可燃範囲が消滅してしまうときの添加気体の混合気中の濃度
 - 着火抑制効果の1つの目安
- 消炎濃度
 - 可燃物が拡散燃焼状態で、消火薬剤を添加していき消炎するときの添加気体の濃度
 - 消火薬剤の濃度が、ピーク値の約2/3程度で消炎する。この時の消火薬剤の濃度が、消炎濃度

消火の基礎

- メタンと空気の混合気に各種消火剤ガスを添加していくときの可燃範囲
 - 燃焼範囲が全く無くなってしまふ添加気体の濃度が、ピーク濃度

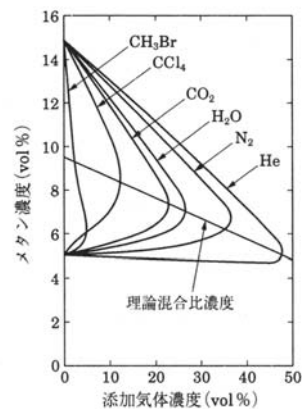


図 4.15 消火剤の添加による可燃範囲の変化^(15,16)
(各曲線の左側が可燃範囲)

消火の基礎

- 泡消化剤
 - 油火災で使用
 - 火炎から液面への熱の供給を遮断
 - 可燃性気体(気化により発生)の火炎への到達を阻止
- 乾燥砂
 - 金属火災で使用
 - 水は燃焼中の金属と反応して水素を発生、爆発を誘起する可能性あり