

## 木材の燃焼と

### 難燃剤の難燃効果

林業研究部 花ヶ崎 裕洋

はじめに

広島県立総合技術研究所林業技術センターでは、木材の不燃化処理技術に関する研究に取り組んでおります。また、平成22年度から「不燃化等高機能木材加工技術研究会」を開催しており、多数の企業の方々に参加して頂いております。参加して頂きました皆様、お忙しい中、ご参加いただきありがとうございます。



第3回不燃化等高機能化木材加工技術研究会 (2011.8.31)

今回のこの記事ですが、木材の燃焼と難燃剤の難燃効果のメカニズムを紹介させていただきます。専門書を調べて分かった

のですが、難燃のメカニズムは奥が深く、専門家の間でも意見が分かれる領域がまだ多くあります。また、その評価方法によっても難燃効果の現れ方が異なる場合があり、難燃剤は研究者を悩ませ続けている研究分野の一つです。

#### 木材の燃焼

木材は燃えると最終的には二酸化炭素と水と灰分になります。ダイオキシンのような毒性の強い物質は生成せず、非常にクリーンな材料となっています。

密度や樹種にも異なりますが、一般的に木材が燃え始める引火点は約280℃ですが、長期的な加熱では約120℃で燃え出したというケースも報告されています。

#### 木材の燃焼メカニズム

温度上昇に伴う木材の燃焼メカニズムですが、まず約100℃までは水分が蒸発していきます。次に約150℃までに木材表面が変色し褐色になります。そして約200℃で木材の成分が熱分解されガスが発生します。このガスの中には、二酸化炭素や水蒸気などの不燃性の気体と水素、一酸化炭素、メタン、エタン、アルデヒド、ケトン類、有機酸などの可燃性の気体、両方が含まれています。可燃性の気体ですが、不燃性の気体に混ざっている状態で、濃度が低い場合は引火しません。木材の温度が上がり、約280℃に達すると、可燃性ガスが多く発生し、発生ガス中における可燃性ガスの濃度が高くなるため、引火して煙が発生します。そして引火すると温度の上昇が早まり、約450℃までは煙を出しながら燃え続け、木材は炭になっていきます。そして約500℃になると、木材は炭に近づき、煙を出さずに燃える赤熱燃焼と言われる燃焼を起します。

生し、発生ガス中における可燃性ガスの濃度が高くなるため、引火して煙が発生します。そして引火すると温度の上昇が早まり、約450℃までは煙を出しながら燃え続け、木材は炭になっていきます。そして約500℃になると、木材は炭に近づき、煙を出さずに燃える赤熱燃焼と言われる燃焼を起します。

木材を燃焼させたときに発生する煙ですが、可燃性ガスの中には、酸素と結びつかずに気体のまま飛んでいく物質がいくらかあり、この中には冷えると液体や固体の小さな粒に変化するものがあります。これらが風に乗って飛んでいく様子が、我々の目には煙として見えるわけです。ときおり、木材を燃やしたときに、白い煙が発生することがあります。この白い煙の原因は、燃焼物に含まれる水素が燃焼時に酸素と結びつくことにより発生する水滴と考えられています。白い煙は、発生した水滴が煙に混ざることにより白く見えているだけで、この白い煙が自然界に対して特殊な悪影響を及ぼすといった効果はないと考えられています。

化学的な解釈では燃焼という現象は酸化反応によって生じます。木材は、セルロース、リグニンを主成分として構成されていますが、これらの物質には炭素が多く含まれています。そしてその炭素が酸素と化合し、酸化することにより木材は燃焼します。この酸化反応ですが、大量の熱を発生させます。そしてその熱から発せられる電磁波が、我々の目には炎として見えるわけです。

#### 木材の難燃化処理と難燃剤

木材の難燃化処理技術としては、現在でも減圧加圧注入機などを用いて、難燃剤を圧力変化により注入する技術が一般的に用いられています。そして難燃剤ですが、難燃剤の歴史は古く、18世紀頃、水溶性薬剤の含浸加工が始まり、第二次世界大戦中に米軍で発見された難燃剤以降、飛躍的に需要を増やしてきました。近年では環境に対する懸念から、西欧で一部の難燃剤を自主規制する動きなどもあり、その影響から様々な種類の難燃剤が開発されています。

#### 難燃剤の種類と効果

一般的に使用されている難燃剤ですが、有名なものを挙げると、ハロゲン系、リン系、無機系、ホウ素系難燃剤が挙げられます。

#### ・ハロゲン系難燃剤

ハロゲン系難燃剤は、比較的少ない添加量で高い難燃効果を示すことが知られていますが、環境に対する悪影響が指摘されており、木材用難燃剤へはあまり多用されていません。難燃のメカニズムは、熱分解によって生じた可燃ガスを希釈する効果とラジカルトラップによる燃焼反応の抑制効果が主な難燃メカニズム

になります。

ラジカルトラップについて簡単に説明させて頂きます。原子や分子の軌道電子は通常、二つずつ対になって存在しており（共有電子対）、安定な状態で存在しています。この状態に燃焼による熱が加わると、同じ軌道に一つしか電子（不対電子）が存在しない状態になります。この一つしか電子が存在しない状態をラジカル状態と言います。このラジカル状態ですが、非常に不安定な状態で、安定に存在している近くの共有電子対に関与し、自らと同じラジカル状態にしてしまう性質があります。この性質により、ラジカル状態が同じ状態を作り出す連鎖反応を引き起こし燃焼（酸化反応）が起こっていきます。そしてラジカルトラップですが、このラジカル状態をある種の原子や分子が反応する（捕まえる）ことにより、活性状態から不活性状態に変化させ、燃焼を抑制する効果のことを言います。

#### ・リン系難燃剤

リン系難燃剤は、有機リン系と無機リン系難燃剤に分かれます。有機リン系難燃剤は、環境ホルモンに対する懸念が一部ありますが、リン系難燃剤全体としては環境対応型難燃剤として需要の伸びが期待されています。リン系難燃剤の難燃メカニズムですが、気相におけるラジカルトラップ効果と固相でのチャー（炭化

層）形成が主な難燃メカニズムと考えられています。チャー（炭化層）の形成による難燃効果について説明させて頂きます。チャー（炭化層）の形成による難燃効果は、簡単に言いますと、不完全燃焼で燃え残った炭を表面に堆積させて、酸素を遮断し、それ以上燃焼（酸化反応）が起こらないようにする難燃メカニズムのことです。リン系難燃剤は、燃え残った炭が表面に堆積するのを手助けする働きがあります。この働きは、化学的に説明すると、リン原子が結合の手を多く持つことに由来していると考えられます。

#### ・無機系難燃剤

無機系難燃剤には、水和金属化合物とガラス系難燃剤があります。水和金属化合物には、水酸化マグネシウム、水酸化アルミニウムなどがありますが、難燃効果は、チャー（炭化層）の形成と脱水による吸熱が主な難燃メカニズムとなります。リン原子と同じく、水和金属化合物に含まれる原子は結合の手が多く、チャー（炭化層）を形成しやすく、無機複合炭化層による断熱効果があると考えられています。次に脱水による吸熱ですが、水酸化マグネシウム、水酸化アルミニウムは、熱を吸収しながら分解する性質があります。水和金属化合物は、このとき水分子を脱離しますが、この脱離した水分子も吸熱して燃焼を遅らせる効果

があります。ただし、この脱水による吸収される熱量は、それほど大きいものではないため、水和金属化合物の難燃効果は他の難燃剤に比べ効果が弱く、難燃剤としては配合量を多くしなければならぬとい指摘されています。

ガラス系難燃剤は、シリカと言われるガラスに近い物質を複合している難燃剤になります。シリカはそれ自体が燃えないため、複合させることで難燃効果が現れます。また、チャー（炭化層）に似た燃焼残渣を形成することも知られており、断熱、酸素遮断効果もあると考えられています。最近の研究では、シリカ粒子が小さくなり、表面積が大きくなるにつれ、難燃性が大きくなるとの報告もされています。これは、粒子が小さい方が、断熱、酸素遮断効果のある燃焼残渣を形成しやすいためと考えられています。

#### ・ホウ素系難燃剤

ホウ素系の難燃剤は、ホウ酸を主成分としているものが多くなっています。ホウ素系難燃剤の難燃メカニズムですが、数種の難燃効果が組み合わさっていると考えられています。炭化を促進し、燃焼している物体から可燃ガスの発生を抑える効果や、化学的に結合している水を放出し、燃焼を抑制すること、そして、溶融したホウ酸が炭化物の周囲に保護膜を形成し、酸化を低減することなどがメカニズムとして考えられています。他の難

燃剤に比べ、炎を上げない赤熱燃焼に効果があるとの報告が多くされています。また、近年の研究では、木材に利用した場合、難燃効果だけでなく、防腐効果、防蟻効果もあることが分かっています。

#### 難燃剤と木材への利用

難燃剤を木材に利用する場合、問題になるのが溶媒を何にするかという問題です。近年では、有機溶媒はVOC（揮発性有機成分）の問題があり、人体に悪影響を及ぼすことがあるため、水溶媒が中心になっています。難燃剤は水溶媒、有機溶媒で溶解量が変わります。また、難燃剤は相乗効果があり、その組み合わせにより難燃効果が大きくなるとの報告もされています。さらに、木材は高湿度条件下で使用されることもあり、木材に利用する難燃剤は、高湿度条件下で使用されても溶け出さないことが必要とされます。環境への影響、コスト的な問題も考慮しつつ、どの難燃剤を木材に利用すべきか考える必要があります。

#### 参考文献

最新木材工業辞典

(社)日本木材加工技術協会  
これでわかる難燃化技術

西澤仁 工業調査会  
木材科学講座4 化学

城代進・鮫島一彦 海青社