

放射加熱された梱包材料の初期燃焼性状

瓶子 桜太 広田 正之 森田 武
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Smoldering behavior of cardboard exposed to external thermal radiation from its top surface

Ota Heishi, Masayuki Hirota and Takeshi Morita

本報告では、大空間かつ高天井となる大規模物流施設などでの早期火災検知に資する基礎的な知見を得るため、可燃物として主な梱包材料である段ボールを対象とし、その初期的な燃焼状態であるくん燃状態での発熱速度、重量減少速度、減光係数、CO および CO₂ の生成速度の時間変化をコーンカロリメータ試験法により測定した。それらの結果から、放射加熱された段ボールの向きにより、熱分解反応および赤熱反応の進行速度が大きく変化すること、放射熱量が大きいほど受熱してから熱分解反応の開始時間までは短くなるが、そこから赤熱反応への遷移時間には殆ど影響しないこと等を実験的に明らかにした。

In order to contribute to early detection of fires in warehouses with large spaces and high ceilings, this report focuses on cardboard as a combustible material, and measures the heat release rate, weight loss rate, extinction coefficient, and CO and CO₂ production rate of cardboard in the smoldering combustion stage using a cone calorimeter. The results show that the progression rate of pyrolysis and red hot reaction of cardboard varies greatly depending on the structure of the cardboard surface receiving external thermal radiation (liner or mediam), and that the induction time from the start of external thermal radiation to the onset of pyrolysis reaction is shorter when the extremal thermal radiation intensity is higher, but the transition time from the start of external thermal radiation to the red hot reaction is hardly affected.

1. はじめに

オンライン通販の増加等を背景に、大規模物流施設の建設は増加傾向にある¹⁾。一方で2017年の埼玉県三芳町で発生した物流施設の火災にみられるように、このような施設ではひとたび火災拡大すると、鎮火までに長時間を要し、広大な範囲が焼失し、多大な損害が発生することもある²⁾。大規模物流施設は他の建物と異なり、間仕切り壁や外窓などが少ないこと、またストックされている販売品など大量の可燃物量が水平及び垂直方向に集積していること、さらに天井が高くスプリンクラーでの抑制が難しいことなどから、万一火災が発生した場合には、短時間で火災が広範囲に拡大してしまうリスクが大きい。しかしながら、このような施設は面積あたりの人員が少なく、人による火災発見は極めて困難である。このことから、倉庫の防火安全対策の一つとして、早期の火災検知が求められており、

迅速な消火活動の実施による被害拡大の阻止が重要となる。

早期に火災を検知するためには、燃焼の初期段階である、可視的な炎はみられないが(無炎)、燻りにより熱分解ガスと煙が発生する「くん焼」性状に着目する必要がある(写真-1)。燃焼学の観点から木や煙草、綿などの代表的な可燃物のくん焼性状が検討されているが³⁻⁶⁾、物流施設における初期可燃物になる可能性の高い梱包用材料である段ボールのくん焼に注目した知見は少ない。

そこで本報では、段ボールのくん焼の基礎的な知見を取得するため、材料の燃焼性状を試験するコーンカロリメータ試験装置を用いて、くん焼する段ボールの発熱速度、CO および CO₂ の生成速度、重量減少速度、および減光係数の時間変化を測定した。また、それらの結果を用いて、段ボールのくん焼の燃焼反応やメカニズムについて考察した。

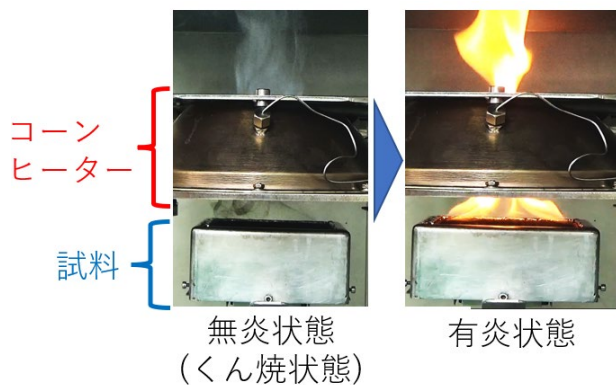


写真-1 コーンカロリメータ試験におけるくん焼状態と有炎燃焼の様子

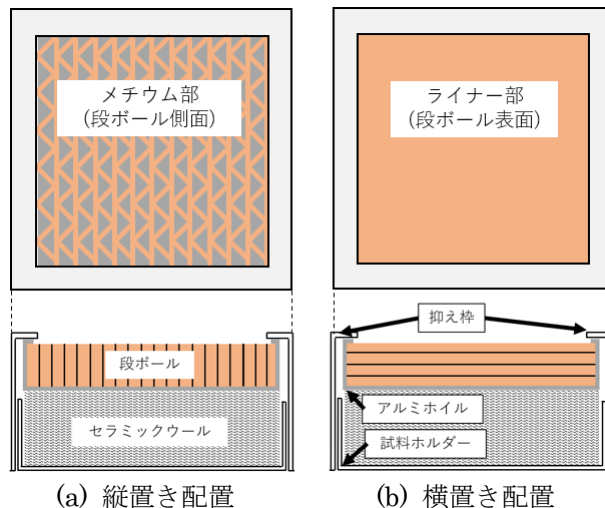


図-1 試料の平面図と断面図

2. 実験

2.1 実験試料

試験体には最も一般的な規格品である A フルート段ボールを使用した。1 段の高さ 5 mm であり、表面と中芯と裏面の 3 枚の原紙から構成されており、中芯が波打ってトラス構造を形成し、断面方向の強度を高めている。

一般的には段ボールは利用前の束ねられた状態、梱包済みの状態、使用後に潰され集積された状態のいずれかで置かれていると考えられ、いずれにせよ何らかの原因で着火するとすれば表紙面側から加熱を受けると予想される。ここでは段ボールの燃焼に関する基礎的な知見を得ることを考慮し、入熱方向による違いを検討するために、加熱を与える面はライナー部(表紙面)が表面になる場合(横置き配置)と、メチウム部(中芯の切断面)が表面になる場合(以下、縦置き配置)の 2 種類とした。

横置き配置及び縦置き配置の試験体サイズは、100 mm×100 mm×20 mm の直方体とした。図-1 に示すように、横置き配置では 1 段 5mm なので 4 枚を平重ねた形で、縦置き配置では 20 枚を立てて並べて試験体とした。どちらも重ね面については接着剤等の接合はしていない。全ての試験体は、湿度による誤差を減らすため、75 °C の乾燥機で 7 日以上乾燥させたのち、室温(23~24 °C)に設置したシリカゲル入りのデシケータ内に保管し使用した。乾燥後の重量は、いずれも 21.5±0.2 g であった。

試料は、100 mm×100 mm×50 mm の試料ホルダ(加熱面サイズ 94 mm×94 mm)のうち、受熱面側から深さ方向に 20 mm までを可燃物層とした。受熱面以外の面(側面と底面)は、25 μm のアルミホイルで包んだ。

2.2 実験装置

本実験には、ISO5660 に準拠したコーンカロリメータ試験装置(Fire Testing Technology 社製)を用いて、発熱速度、減光係数、CO、CO₂ 生成速度を測定した。図-2 には一般的なコンカロリメータの模式図を示す。本試験装置は一般的に試験体表面にコーンヒーターから放射加熱を与えた状態で、電気火花(スパーク点火器)を試験体とコーンヒーターの間に入れることで、材料から発生する可燃性ガスに強制的に着火し、酸素消費法により発熱速度を算出する装置である。また、ダクト内に設置したレーザー煙濃度計により、減光係数を計測可能となっている。本実験ではスパーク点火器を入れず、放射加熱のみを与え、くん焼燃焼状態を作り出した。また、試験中はビデオカメラ(SONY, HDR-CX535)により撮影した。

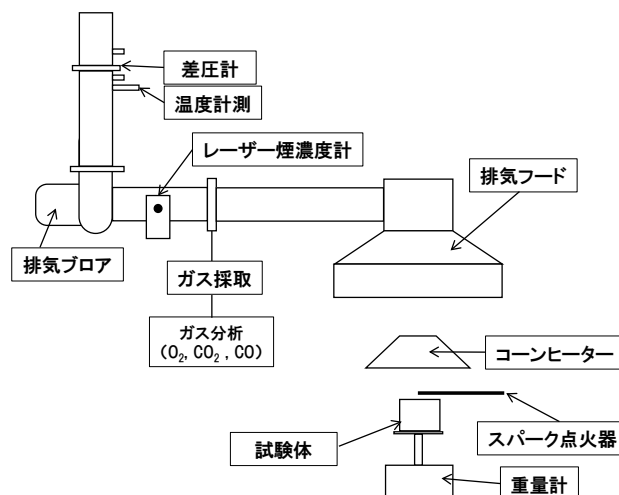


図-2 コーンカロリメータ試験装置の模式図

2.3 実験方法

実験ケースとして、試験体を縦置き配置と横置き配置の2種類、負荷放射熱量は10~30 kW/m²の範囲で5 kW/m²ごとに5種類とし、これらを組み合わせ計10ケースとした。

また、各ケースは3回測定し、再現性を確認した。以降の結果は計測回数3回のうちの中間的な1つの結果を掲示する。

3. 実験結果

3.1 実験の観察結果及び表面での反応

3.1.1 炭化過程と赤熱過程

写真-2.1と写真-2.2には、縦置き配置と横置き配置の負荷放射熱量が25 kW/m²における試験体受熱面の様子を示す。写真に示した時間は、試験体表面が放射熱を受け始めてからの経過時間を表す^{注1)}。

加熱開始後に煙が発生しながら、試験体表面が黒く変色し、時間経過すると赤く光った(赤熱燃焼した)のち、最後に白い灰へと変化していく過程が観察できた。15 kW/m²~25 kW/m²では、25 kW/m²と同様の变化を示した。しかし、負荷放射熱量30 kW/m²では、試料の配置方法に関わらず、加熱開始30秒以内に発火に至った。(写真-1 右の有炎状態)また、10 kW/m²では表面が黒くなる様子が確認できたが、赤熱燃焼に移行することはなかった。

平野³⁾は、木材をくん焼させたとき、熱分解により熱分解ガスが発生し炭(炭素)が固体として残る「炭化反応」と、炭が赤くなり炎を上げずに燃焼する「赤熱反応」の二種類の反応が進行すると報告しており、同様の反応が段ボールにおいても進行している。

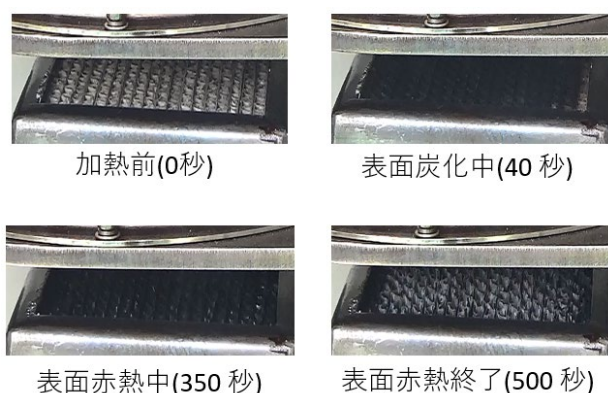


写真-2.1 縦置き配置 25 kW/m²の表面の様子

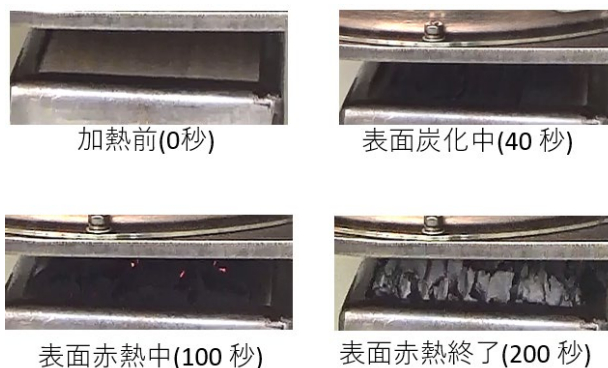
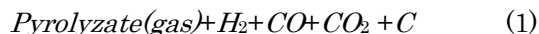


写真-2.2 横置き配置 25 kW/m²の表面の様子

セルロースの炭化過程は主に以下の式(1)、式(2)のような反応式で表せる⁵⁾。ここで、Pyrolyzate (gas)はセルロースが熱分解した際に発生する炭化水素やアルデヒド等の複数の有機ガスが混合した熱分解ガス⁷⁾である。

$Cellulose + Heat \rightarrow$



$Pyrolyzate(gas) + O_2 \rightarrow$



また、式(1)の炭化過程で発生した炭素が赤熱する反応は式(3)、式(4)のような反応式で表せる。



3.1.2 炭化開始時刻と赤熱開始時刻

15 kW/m²~25 kW/m²の負荷放射熱量を課した縦置き配置と横置き配置の各ケースにおいて、炭化開始時刻および赤熱開始時刻を考える。

炭化過程では受熱面が徐々に黒く変色するため、目視による炭化開始時間の決定は困難であった。そこで、本報では、発熱速度の時間変化が直線的に増加している時間帯に着目し、この時間帯の発熱速度と時間との関係を直線近似し、この近似線とx軸の交点を炭化開始時刻とし定義した。代表例として、縦置き配置15 kW/m²の発熱速度の時間変化と炭化開始時刻の決定方法を図-3に示す。なお、赤熱の開始時刻についてはビデオ画像から目視で判断した。試験体表面が放射熱を受け始めてから、表面で炭化が開始されるまでの時間と受熱面で赤熱が開始されるまでの時間(以後、炭化開始時間と記す)を図-4.1に、炭化開始から赤熱開始までの時間(以後、赤熱開始時間と記す)を図-4.2に示す。なお、縦置き配置

の場合、いくつかのケースにおいて上記の赤熱開始時間よりも前に表面のごく小さい部分で赤熱が確認されたが、燃え広がらずに数秒で赤熱箇所が見えなくなる現象が見られた。これは、段ボールのトラス構造部にできた角や、段ボールを指定の大きさに切り出す際に発生した微細な突起部等が局所的に赤熱を開始するものの、その周囲の温度が十分ではない、あるいは酸素が不十分で燃え広がらなかったためと推測できる。この現象は、実験条件が同条件であっても赤熱箇所の発生時間や出現頻度が一致せず、再現性が認められなかったことを踏まえ、今回は受熱面での赤熱箇所が燃え広がり、10秒以上持続し始めた時刻を赤熱開始時間とした。

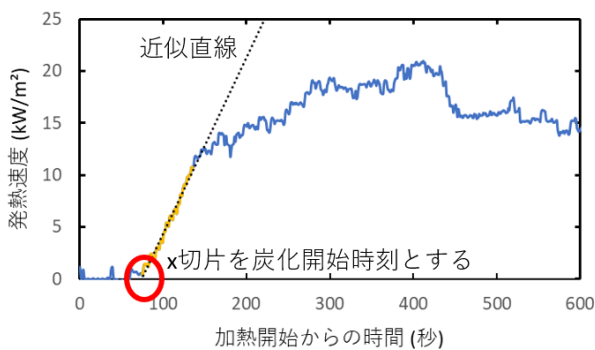


図-3 発熱速度時間変化と炭化開始時刻の取り方 (縦置き配置 15 kW/m²)

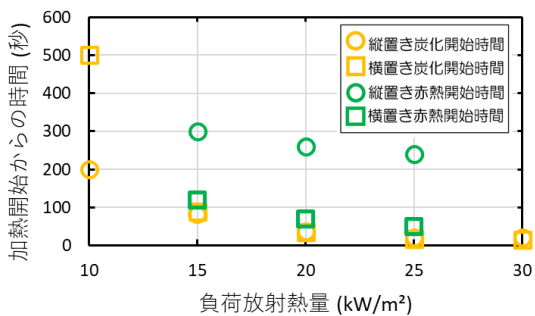


図-4.1 加熱開始から炭化開始までの時間と加熱開始から赤熱開始までの時間

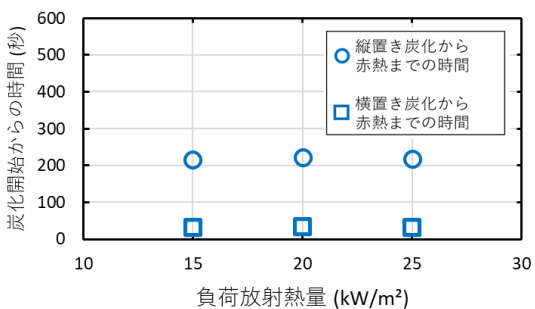


図-4.2 炭化開始から赤熱開始までの時間

図-4.1 より、炭化開始時間は熱放射強度が大きいほど短くなり、負荷放射熱量を 10 kW/m² としたケースを除いて試料の配置には影響されなかった。また、図-4.2 から、炭化開始から赤熱開始までの時間は、負荷放射熱量には影響されず、試験体の配置毎にほぼ一定値となった。

3.2 各測定値の炭化開始時刻からの時間変化

第 3.2.1 節~第 3.2.5 節に示す時間変化グラフでは、段ボールの受熱面、負荷放射熱量との関係を確認するために、炭化開始時間をゼロとして、炭化開始時間後の発熱速度、重量減少速度、減光係数の時間変化を示した。また、各グラフ中の赤点線は各ケースの赤熱開始時間の平均値を意味する。

3.2.1 発熱速度

縦置き配置と横置き配置における負荷放射熱量を変化させたときの発熱速度の時間変化を、それぞれ図-5.1と図-5.2に示す。赤熱開始時間に着目すると、図-5.1より、縦置き配置では発熱速度の上昇が緩やかになった後に赤熱しているのに対し、図-5.2にあるように横置き配置では発熱速度が急上昇している立上りの時間帯に赤熱が開始していた。また、いずれの配置においても、それぞれの発熱速度の最大値は負荷放射熱量に影響をあまり受けないが、横置き配置の方が縦置き配置よりも発熱速度は大きくなる。また、横置き配置で発熱速度が最大値となる時間は、負荷放射熱量大きいほど早くなる。

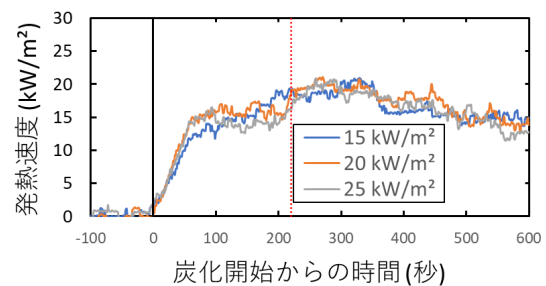


図-5.1 縦置き配置での発熱速度時間変化

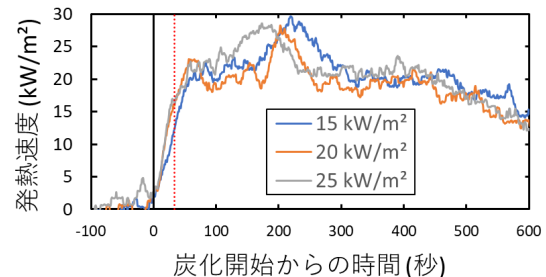


図-5.2 横置き配置での発熱速度時間変化

3.2.2 重量減少速度

縦置き配置と横置き配置における負荷放射熱量を変化させたときの重量減少速度の時間変化を、**図-6.1**と**図-6.2**に示す。**図-6.1**より、赤熱開始時間に着目すると、縦置き配置では重量減少速度が減少傾向に転じたのちに赤熱が開始している。また、赤熱開始までの重量減少速度は負荷放射熱量が大きいほど大きい傾向を示すのに対し、赤熱開始後の重量減少速度は負荷放射熱量にあまり影響を受けていない。一方、**図-6.2**に示すように、横置き配置では重量減少速度が最大値を取る時間に赤熱が始まり、その後は増減を繰り返しながら減少している。また、赤熱開始前は縦置き配置と同じく負荷放射熱量が大きいほど重量減少速度が大きくなり、赤熱開始後は負荷放射熱量によって異なる傾向を示した。

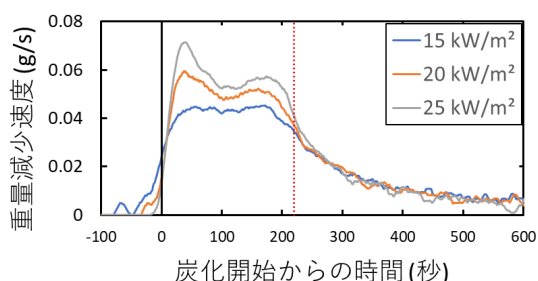


図-6.1 縦置き配置での重量減少速度時間変化

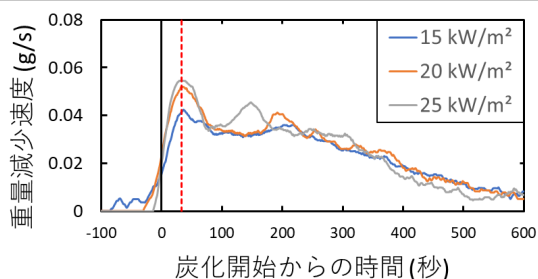


図-6.2 横置き配置での重量減少速度時間変化

縦置き配置では、赤熱開始時間までは負荷放射熱量が大きいほど重量減少速度は大きくなるが、赤熱開始時間以降では負荷放射熱量の影響は小さい。また、横置き配置において100秒以降の時間帯で重量減少速度の最初のピークが現れる時間は15 kW/m²のケースでは220秒、20 kW/m²のケースでは190秒、25 kW/m²のケースでは150秒と、負荷放射熱量が大きいほど早くなり、横置き配置での発熱速度の時間変化の最大値が現れる時間と似た傾向を示す。

3.2.3 減光係数

縦置き配置と横置き配置における負荷放射熱量を変化させたときの減光係数の時間変化を、**図-7.1**と**図-7.2**にまとめた。**図-7.1**から、縦置き配置では減光係数が低下してから赤熱が開始している。また、負荷放射熱量が大きいほど減光係数の最大値は大きくなるが、減光係数が最大値を示した後は負荷放射熱量の影響は小さい。一方、**図-7.2**より、横置き配置では、減光係数が最大値を取る時間とほぼ同じ時間に赤熱を開始している。また、縦置き配置と横置き配置を比較すると、炭化が開始してから180秒程度までは縦置き配置の方が減光係数は大きい、その後減少を始めると横置きに比べて早く減光係数は0 (1/m)になる。一方で、横置き配置では、縦置き配置に比較して減光係数は小さい値で推移するが、減光係数が0 (1/m)になるまでの時間は横置き配置の方が長くなっている。

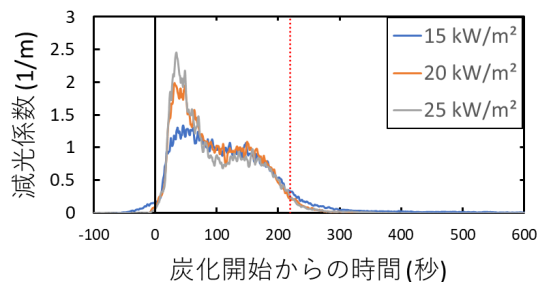


図-7.1 縦置き配置での減光係数時間変化

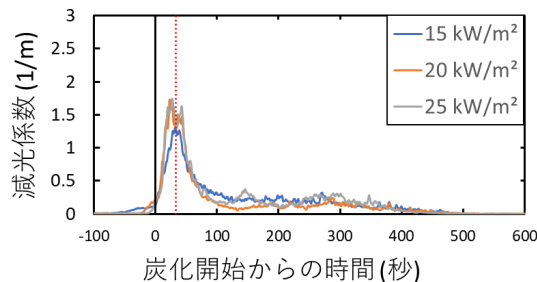


図-7.2 横置き配置での減光係数時間変化

3.2.4 CO生成速度

縦置き配置と横置き配置における負荷放射熱量を変化させたときのCO生成速度の時間変化を、**図-8.1**と**図-8.2**にまとめた。**図-8.1**より、縦置き配置では各ケースとも、赤熱開始時間からCO生成速度は減少を始めている。また、赤熱開始までは負荷放射熱量が大きい方がCO生成速度は大きい、赤熱を開始してCOが減少を始めからは負荷放射熱量の影響は小さくなった。一方、横置き配置では、**図-8.2**のように炭化開始からCO生成速度が徐々に上昇している途中で赤熱を開始している。

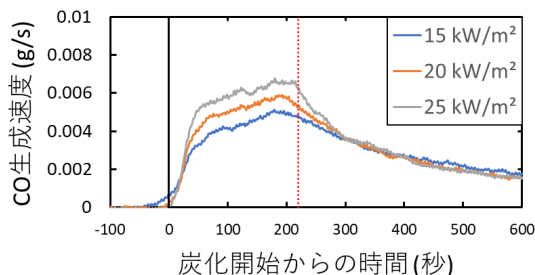


図-8.1 縦置き配置のCO生成速度時間変化

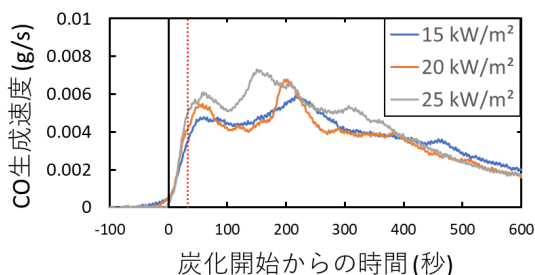


図-8.2 横置き配置のCO生成速度時間変化

3.2.5 CO₂生成速度

縦置き配置と横置き配置における負荷放射熱量を変化させたときのCO₂生成速度の時間変化を、図-9.1と図-9.2にまとめた。図-9.1より、縦置き配置ではCO₂生成速度が最大値となる時間の前後に赤熱を開始している。また、横置き配置では図-9.2のように、CO₂生成速度が最初に上昇している途中で赤熱を開始している。

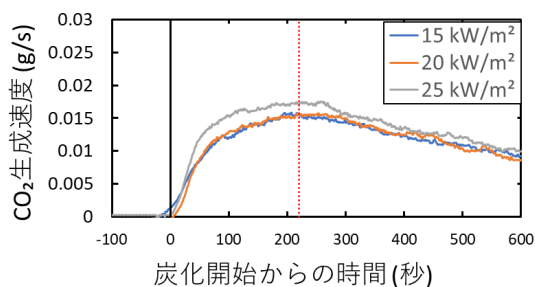


図-9.1 縦置き配置のCO₂生成速度時間変化

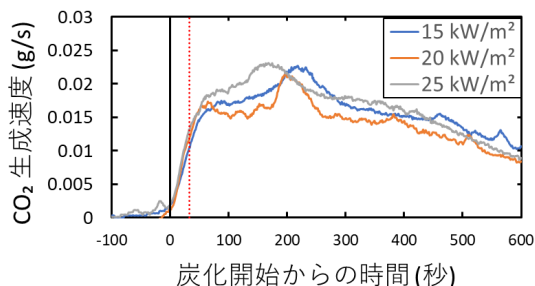


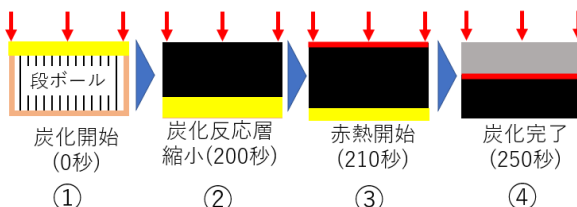
図-9.2 横置き配置のCO₂生成速度時間変化

4. 考察

4.1 試料内部の反応

第3.1節に示したように、本実験で15 kW/m²～25 kW/m²の負荷放射熱量を課したケースでは炭化過程と赤熱過程の両方を確認した。J.L.Toreroらは、タバコや石炭等のくん焼では可燃物表面から可燃物の内部に向かって反応が進行すると報告している⁸⁾。今回の実験の結果を踏まえると、段ボールのくん焼でも同様に、図-10に示すように放射熱を受ける表面から試料の下端(試料ホルダーの底面)に向けて、炭化反応層、赤熱反応層、炭の層および灰の層が進行していったと考えられる^{注2)}。なお、図-10に示した時間は25 kW/m²での炭化開始からの時間を表すが、各時刻は負荷放射熱量の影響が小さいため、他のケースでも大きくは変化しない。また、第3.1.1節の赤熱反応の式(3)、式(4)のように、赤熱過程ではCOとCO₂が発生するが、いずれも無色透明な気体である。ここから、赤熱過程では目に見える煙は発生せず、減光係数の結果は赤熱よりも炭化に大きく影響を受けると考えて、減光係数の結果から炭化反応層が縮小を開始した時間と炭化完了の時間を推定した。

縦置き配置の場合



横置き配置の場合

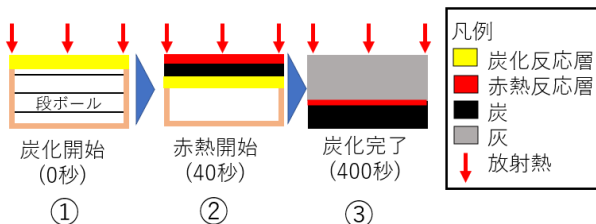


図-10 段ボールのくん焼の進行

以下、図-10の各ステップについて説明する。

縦置き配置

- ① 炭化が開始し、表面で炭化反応層が形成される。
- ② 炭化反応が進行し、炭化反応層が試料の下端方向へ進む。反応が終了した部分は炭の層になる。その後、煙発生速度は赤熱にはあまり左右されず、炭化過程に依存することから、煙発生速度が減衰しはじめる200秒付近に炭化反応層が試料

の下端に到達し、炭化反応中の体積が減少に転じたと考えられる。

- ③ 赤熱が開始する。
- ④ 煙の発生が終了したことで、炭化反応も終了したと考えられる。

横置き配置

- ① 炭化が開始する。
- ② 赤熱が開始する。
- ③ 煙の発生終了時刻から、400 秒付近で炭化反応層が試料の下端に到達し、炭化反応が終了したと考えられる。

縦置き配置の④と横置き配置の③にあるように、縦置き配置の方が早く炭化反応が完了する理由は、熱放射を受ける表面の違いが原因であると考えられる。縦置き配置の場合、上から見ると中芯部は穴が開いているように見え、上方から熱を受けた場合、試料底部までよく放射熱が届きやすい構造になっている。一方で横置き配置では段ボールのライナー(平らな面)が試料表面にあるため、すべての放射熱をこの表面で受ける構造になっている。反応が進行しても表面には比熱の高い炭や灰が積もり、試料内部への伝熱は比較的小さくなる。そのため、縦置き配置の方が横置き配置の場合よりも早く試料の中心部や底部で炭化反応を開始し、反応を終了したと考えられる。(図-11)

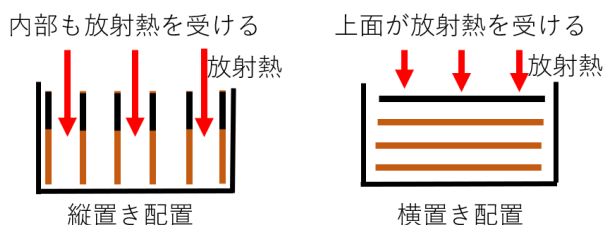


図-11 配置方法による放射熱の受け方の違い

4.2 各測定値の時間変化の比較

発熱速度と重量減少速度、減光係数の関係を明らかにするため、同ケースでの各測定値の時間変化を比較した。グラフには一例として縦置き配置と横置き配置で 25 kW/m²の負荷放射熱量を与えたケースの測定値を示した。赤点線は、各ケースの赤熱開始時間の平均値である。

4.2.1 発熱速度と重量減少速度の関係

図-12.1 と図-12.2 はそれぞれ縦置き配置と横置き配置における発熱速度と重量減少速度の時間変化の関係を比較した二軸グラフである。図-12.1 より、縦置き配置の場合、赤熱開始から重量減少速度

が下がっているにも関わらず、発熱速度が上昇している。これは炭化反応層の縮小に伴って重量減少速度が減少していくのに対し、赤熱によって発熱速度が上昇しているためであると考えられる。

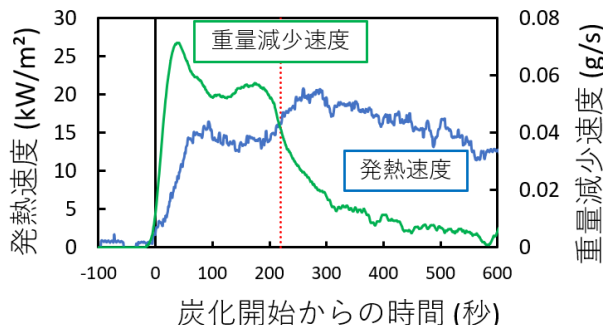


図-12.1 発熱速度と重量減少速度(縦置き配置)

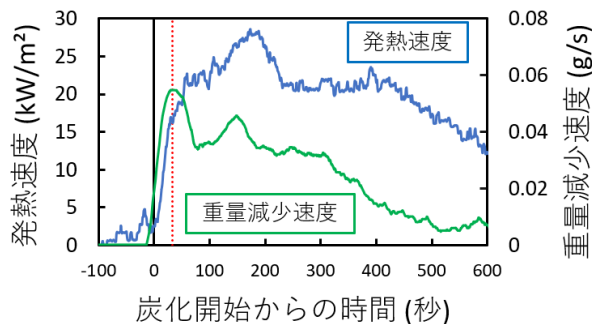


図-12.2 発熱速度と重量減少速度(横置き配置)

4.2.2 減光係数と重量減少速度の関係

図-13.1 と図-13.2 はそれぞれ縦置き配置と横置き配置における減光係数と重量減少速度の時間変化の関係を比較した二軸グラフである。双方とも、増減の傾きは異なるが、増加している時間帯や減少する時間帯は似た傾向を示している。第4.1節で述べたように、減光係数は炭化過程に大きく影響を受けていると仮定すると、重量減少速度も赤熱過程よりも炭化過程に大きな影響を受けているといえる。

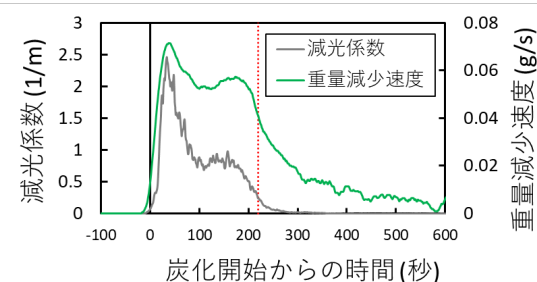


図-13.1 減少速度と重量減少速度(縦置き配置)

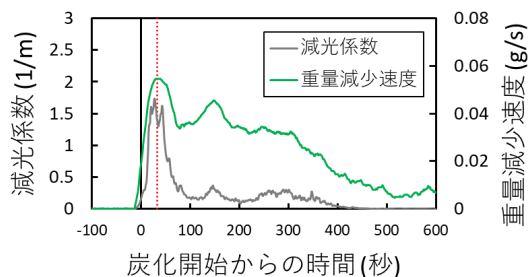


図-13.2 減少速度と重量減少速度(横置き配置)

4.2.3 横置き配置における赤熱開始後のピーク

横置き配置において、重量減少速度は赤熱を開始した時間に最大値を示しているが、赤熱開始の後、増減を繰り返しながら全体的に減少していく時間帯にいくつかのピークを示している。また、発熱速度、CO生成速度、CO₂生成速度が最大になるのは赤熱開始後である。このピークを示す時間が負荷放射熱量によって異なっていることに着目し、各ケースにおいて、赤熱開始以降の初めてピーク時間を図-14に示す。

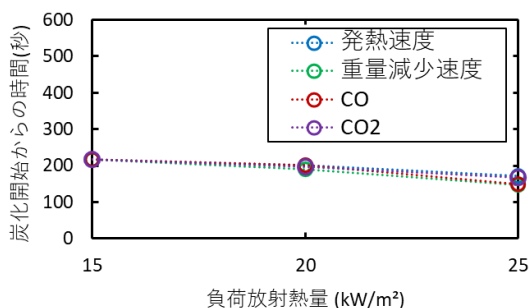


図-14 赤熱開始後に各測定値が初めてピークを示す時間

各測定値はほぼ同じ時間にピークを示していること、横置きではこの時間では炭化と赤熱の両方が進行中であることから、ピークを示した時間に炭化中の体積と赤熱中の体積の両方が増加していると考えられる。このピークは縦置きでは見られないことも踏まえると、横置きにした段ボールに亀裂が入る等して、一段下の段ボールに放射熱が入り始めたことで下の段ボールの反応が開始し、これらのピークが現れたと推測できる。なお、試料の一番上面の段ボールに亀裂が入ったのは観察によると赤熱を開始して数秒後であったため、試料の上面から二段目の段ボールに亀裂が入ったと推測できる。

4.3 赤熱開始時間

図-4.1、図-4.2にあるように、受熱開始から炭化開始までの時間は試料の配置方法よりも負荷放射熱量に影響を受ける一方、炭化開始から赤熱反応までの時間は試料の配置方法に大きく影響を受け、負荷放射熱量にはあまり影響を受けない。これは炭化過程と赤熱過程の反応の違いから以下のように推測できる。炭化過程は酸素を必要としない吸熱反応⁹⁾であり、受熱することで反応が進行するため試料の配置方法よりも負荷放射熱量に大きく影響を受けたと考えられる。一方で赤熱過程の場合、酸素を必要とする発熱反応であるため、反応面への酸素の供給が重要な要素になってくる。今回の実験では試料上面以外はアルミホイルに包まれており、赤熱のための酸素は基本的に上面から供給されないと考えられる。ここで、縦置き配置の場合、図-11にあるように、ヒーターからの放射熱が上面だけではなく、試料中心部や下端まで届く。試料上面の炭化が完了した後も試料の中心部や底部の炭化が進行することで、第3.2.3節で述べたように、熱分解ガスの発生が横置き配置に比べて長く続いたと考えられる。この熱分解ガスの流れによって周囲の空気からの上面への酸素の供給阻害が起こったと推測できる。一方、横置き配置の場合、上面の一枚の段ボールが炭化を終えると、上面のライナーに亀裂が入る等するまでは残った炭によってコーンヒータの放射熱が遮られ、中心部や底部にまで届かない。そのため、縦置き配置に比べて熱分解ガスの発生が早く減少する。その結果、縦置き配置に比べて早い時間に周囲の空気から上面に十分な酸素が供給され、縦置き配置よりも早く赤熱開始に至ったと推測できる。(図-15)また、図-8.1において、縦置き配置で減光係数が減少した時間帯に赤熱が発生していることも、第3.1.2節で述べた赤熱開始時刻に関する推測を補足する結果であると言える。ただし、横置きについては減光係数が最大値に達した時刻に赤熱を始めている。試料上面の構造的な影響は推測できるが、詳細な検討は今後の課題である。

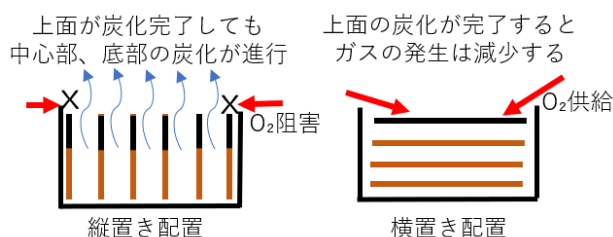


図-15 煙の発生と試料表面への酸素供給

5. まとめ

本研究では、梱包材量のくん焼の基礎的な知見の取得として、コーンカロリメータ試験装置を用いて段ボールをくん焼させた際の発熱速度、重量減少速度、減光係数、CO・CO₂の生成速度を測定した。その結果から、以下の事項が明らかとなった。

- 段ボールのくん焼では配置方法が異なると、測定値の値、および時間変化の様子が異なる。
- 負荷放射熱量が大きいほど加熱開始から炭化開始までの時間が短くなる。
- 炭化開始から赤熱反応までの時間は負荷放射熱量にあまり影響されない。

また、上記の結果を踏まえて、炭化と赤熱に関して以下のような考察を行った。

- 加熱面が異なるとくん焼の挙動も異なるのは、試料内部が直接加熱を受けるかどうかで試料内部の炭化の進行が異なってくることが原因と考えられる。
- 炭化が開始されてから赤熱反応が始まるまでの時間は、酸素が試料の表面(上面)に十分供給されるかどうかに影響されていると考えられる。

今後は上記の考察で述べたような反応メカニズムを考慮し、早期火災検知について検討を続けていく。

謝辞

本研究にあたっては横浜国立大学の岡泰資教授と公立諏訪東京理科大学の上矢恭子准教授に多大なご協力を頂きました。ここに深謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 国土交通省：“建設工事受注動態統計調査”，2023
- 2) 埼玉県三芳町倉庫火災を踏まえた防火対策及び消防活動のあり方に関する検討会：“埼玉県三芳町倉庫火災を踏まえた防火対策及び消防活動のあり方に関する検討会報告書”，総務省消防庁，国土交通省，2017
- 3) 平野敏右：“スモルダリングの発生と伝ばの解析”，スモルダリング(くん焼)資料集，1989
- 4) Bjarne C.Hagen, et al. :”Transition from smoldering to flaming fire in short cotton samples with asymmetrical boundary conditions “, Fire Safety Journal vol.71, pp.69–78, 2015
- 5) G.Rein: “Smoldering Combustion” , SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th Edition, pp 581-603, Springer, 2016
- 6) 斉藤文春：“木質材料の燃焼挙動”，木質保存，1983，23, pp.21-31, 1983

- 7) 春山鴻, 高月紘：“セルロースの燃焼”，環境技術, pp. 564-572, 1973
- 8) JoséL. Torero, et al. : “Processes defining smouldering combustion: Integrated review and synthesis” , Progress in Energy and Combustion Science, vol. 81, 2020
- 9) 河本晴雄:セルロースの熱分解反応と分子機構, 木材学会誌, Vol.61, No.1, pp.1-24, 2015

<注釈>

- 注1) 各写真は炭化開始、赤熱開始の時刻を捉えたものではなく、あくまで炭化が進行中、赤熱が進行中の様子が判別しやすい時刻の写真を掲示している。
- 注2) 便宜上炭化反応中の部分を黄色で表しているが、実際には黒くなり始めた段ボールの色である。

