

# 燃え拡がりに関する粉粒体・ペレット堆積層の特性†

八島正明\*1

本研究では、堆積層（充てん層）内の燃え拡がりにおける基本的な特性データの収集を目的に、空隙率に対する有効熱伝導率（みかけの熱伝導率）、比熱、通気性に影響する圧力損失を測定した。有効熱伝導率の測定はJIS A 1412, ISO 8301 などの規格に準拠する定常法により行った。試料としては、木球や木材ペレット、RPF（プラスチック・紙ごみ固化燃料）、PMMA、大豆を用いた。ペレット試料の寸法を相当直径で整理した。測定の結果、有効熱伝導率  $\lambda_e$  は試料寸法とともに増加すること、みかけの比熱  $c_e$  の試料寸法への依存性は小さいこと、圧力損失は試料寸法が小さいものほど大きくなり、両対数表記では流速と圧力損失は直線的に変化することなどがわかった。また、燃え拡がり速度を推算する上では、有効熱伝導率に対流の影響を考慮すべきであることがわかった。くん焼の様式で燃え拡がる試料については、堆積層の圧力損失が 20~30 Pa/m を超えると、堆積層内の空気の流れが不十分で燃焼を維持できずに消炎することが推測された。

キーワード: 粉体火災, 粉体層, 充てん層, 有効熱伝導率, 比熱, 圧力損失.

## 1. はじめに

可燃性の粉体や固体をサイロ、タンクあるいはストックヤードなどに堆積した状況では、時間とともに発熱を伴う反応が生じることがあり、発生した熱は層内を伝わる。周囲への放熱よりも発熱が大きい場合には蓄熱し、発火に至る場合がある<sup>1)</sup>。発火すると、層内を燃焼帯が伝ばする現象、燃え拡がりがみられるようになり、火災に至る。このような発熱から発火して燃え拡がる現象は堆積層内の熱移動と気体の流動に依存し、堆積物個々の特性だけではなく固気相での諸特性、例えば、空隙率、層内外の通気性・流れ、熱伝達特性などの影響を受ける<sup>2)</sup>。したがって、初期事象の発熱から燃え拡がりを予測する上では、堆積層内の諸特性を把握しておく必要がある。本研究では、堆積層（充てん層）における基本的な特性データの収集を目的に、空隙率に対する有効熱伝導率（みかけの熱伝導率）、比熱、通気性に影響する圧力損失を測定した。そして、堆積層の燃え拡がりに関連付けて考察した。試料としては、木球や木材ペレット、RPF（プラスチック・紙ごみ固化燃料）などを用いた。

## 2. 堆積層の特性

### 1) 有効熱伝導率と比熱

一般に充てん層の空隙率  $\varepsilon$  は次式で表される。

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \text{隙間の体積} / \text{全体積} \\ &= (\text{全体積} \cdot \text{充てん物の全体積}) / \text{全体積} \\ &= 1 - (\text{充てん物の全重量} / \text{充てん物の密度}) / \text{全体積} \end{aligned} \quad (1)$$

† 本報の一部は、第 54 回安全工学研究発表会講演予稿集, pp. 113-114, 2021 の記述の一部を加筆修正し、まとめ直したものである。

\*1 労働安全衛生総合研究所化学安全研究グループ

連絡先: 〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6

労働安全衛生総合研究所 化学安全研究グループ 八島正明

E-mail: yashima@s.jniosh.johas.go.jp

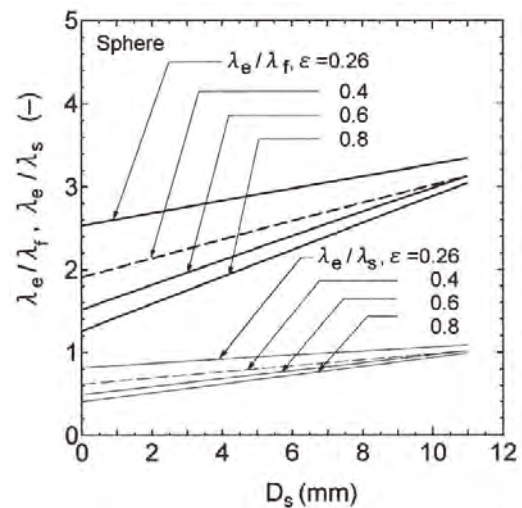


図1 充てん層における試料寸法と有効熱伝導率の関係<sup>7)</sup>

充てん層の有効熱伝導率  $\lambda_e$  の取扱いに関しては、流体と固体のそれぞれの熱伝導率  $\lambda$  と空隙率  $\varepsilon$  の割合から単純に次式で求めることができる。

$$\lambda_e = \varepsilon \lambda_f + (1 - \varepsilon) \lambda_s \quad (2)$$

ここで、 $\lambda$  の添字の f は流体（気体）、s は固体（粉体）を表す。式(1)は  $\varepsilon$  に対して単純に直線的な変化を示すが、固体の大きさや形状の影響にはよらないものである。固体の大きさや形状、 $\varepsilon$  を因子とする充てん層の  $\lambda_e$  の推算式として、国井の式あるいは国井-Smith の式がよく知られている<sup>3-6)</sup>。

$\varepsilon$  について、最密充てんの  $\varepsilon=0.26$  から 0.8 まで変えて国井の推算式に代入し、球形固体の直径  $D_s$  に対する静止気流中での  $\lambda_e/\lambda_f$  と  $\lambda_e/\lambda_s$  の変化を求めた結果を図1に示す<sup>7)</sup>。この結果から、 $\lambda_e$  は  $D_s$  とともに増加する傾向が推測される。

### 2) ペレットの相当直径

実験に用いた試料径  $D_s$  と長さ  $L_s$  の組み合わせに対して、相当直径<sup>8)</sup>として、形状から算出する等価表面直

径（表面相当直径） $D_{se}$ 、等価体積直径（体積相当直径） $D_{ve}$ を導入した。

### 3. 測定装置および測定方法

#### 1) 有効熱伝導率の測定

本実験では、定常法により充てん層の熱伝導率を測定するため、測定装置 HFM446 Lambda Medium (NETZSCH 製) を使用した (図 2)。この装置は JIS A 1412<sup>9)</sup>、ISO 8301<sup>10)</sup>などの定常法測定の規格に準拠するものである。試料としては幅 305×奥行 305×高さ  $H$  105 mm の体積まで測定できる。測定温度範囲は -20~90 °C で、上下の平板で試料をはさみ、所定の荷重を加えて測定できる。図 3 に測定の概要を示す。本実験で用いた試料は粒体とペレット(円柱体)形状のもので、2 種類の大きさの充てん用型枠 (240×240× $H$  50 mm, 160×160× $H$  80 mm)を用いた。型枠の材質は発泡スチロールである。荷重は 0.1 から 0.2 kPa とした。この値は測定装置の設定上、最小値に近い荷重に相当する。特に本測定は木材の変形を避けるため、荷重の影響は調べなかった。

試料は木材ペレット (ベイツガ)、木球 (同)、木質ペレット (2 種類：木種不明のホワイトペレットとアカマツ・カラマツの全木ペレット)、RPF、PMMA 原料樹脂



図 2 熱伝導率測定装置の外観

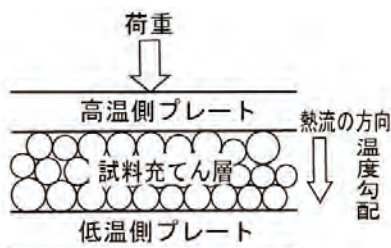


図 3 熱伝導率の測定の概要

ペレット、PMMA ペレット、そして大豆である。木材ペレットは直径×長さの組み合わせについてアスペクト比 2.5 と 1 とし、10×25 mm, 15×15 mm, 15×37 mm, 22×22 mm, 22×55 mm, 30×30 mm, 30×75 mm の 7



図 4 試料を型枠に充てんした様子

種類を作製した。木球は木材ペレットと同じベイツガとし、等価直径を考慮して、直径 25 mm と 36 mm の 2 種類を作製した。ただし、木材は雰囲気によって収縮するので、直径と長さが常に一定とは限らない。PMMA ペレットは直径 15 mm×長さ 37 mm で、木材ペレットの寸法に合わせたものを作製した。大豆の等価直径は楕円体を仮定して求めた。

測定前の試料はすべてシリカゲル入りのデシケータに保管した。図 4 に試料を充てんした様子を示す。

木材では含水率を把握しておく必要がある。筆者らが過去に水分計を使って木材の含水率を求める際、木材を粉砕して測定したところ、室内の温度と湿度によっては粉砕過程で木粉内の水分が減りやすく、測定時に正確な含水率を求めることが難しかった。粉状にして測定する TG (熱重量) 分析についても同様である。これらのことから、熱伝導率や比熱の測定に合わせた含水率の測定は行わなかった。ただし、実測の密度と乾燥状態の密度から推測すると、含水率は 15~16%程度にあると考えられる。なお、測定室の温度と相対湿度は平均 25.1 °C (範囲 22.3~29.1°C)、平均 55.4% (範囲 39~71%) であった。

測定温度については 23 °C (上面 33 °C・下面 13 °C : 温度差 : 20 °C) を標準温度とした。試料の寸法を整理する上で、球体に対する表面積あるいは体積の等価直径 ( $D_{se}$ ,  $D_{ve}$ ) を導入した。充てん状態によるデータのばらつきを考慮して、毎回の測定で充てんをし直し、 $H=80$  mm 充てん用型枠では 4 回測定を標準とした。

#### 2) 比熱

上述の熱伝導率測定装置は堆積層の比熱  $\alpha$  も測定できるもので、温度 20, 23, 25, 30 °C における  $\alpha$  を測定した。

#### 3) 圧力損失

本測定では、直円管に堆積層部を設け、空気流速  $V_{in}$

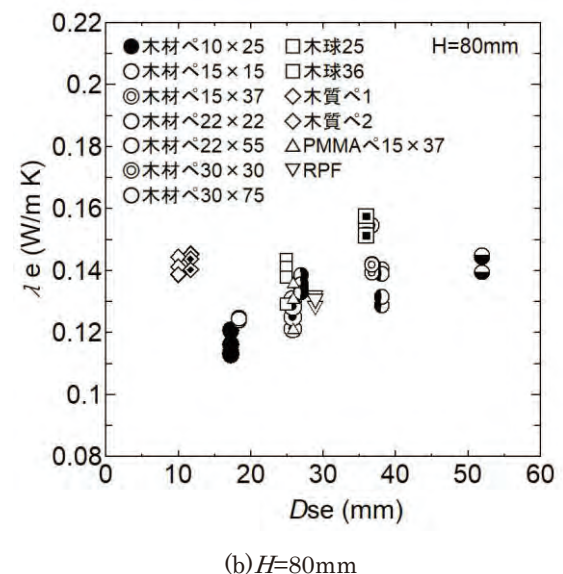
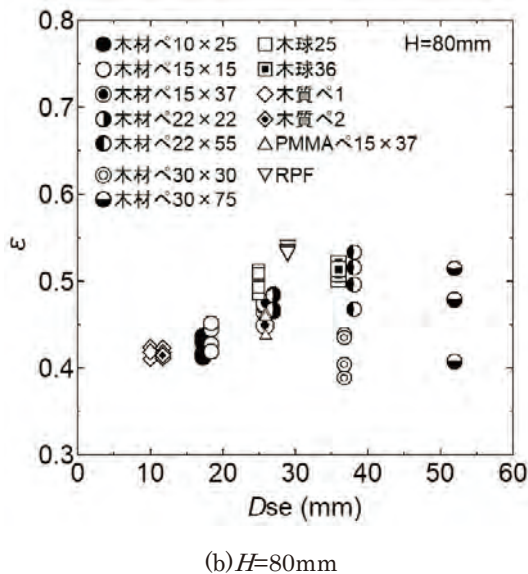
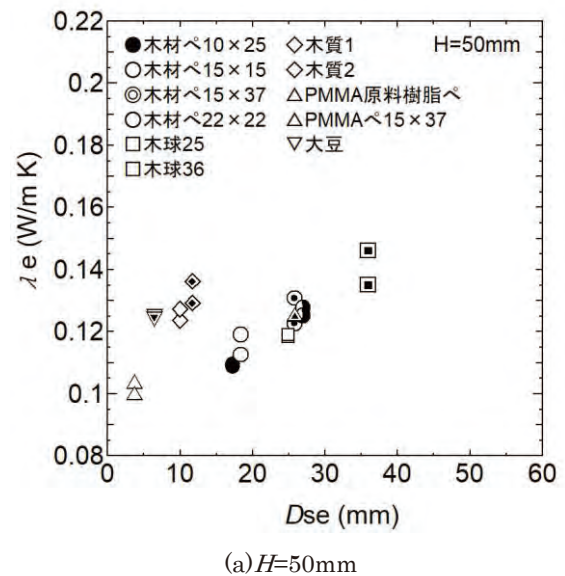
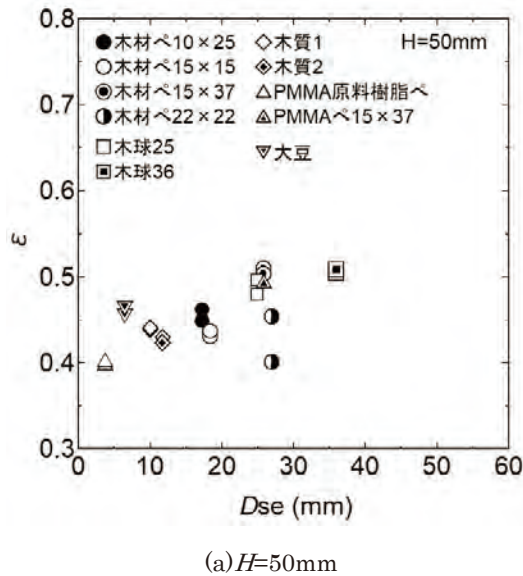


図5  $Dse$  と  $\varepsilon$  の関係 (測定温度  $23^\circ\text{C}$ )

図6  $Dse$  と  $\lambda e$  の関係 (測定温度  $23^\circ\text{C}$ )

(空塔速度) に対する堆積層の上流と下流での圧力差  $\Delta P$  を圧力損失として求めた。測定では、アクリル円管 (内径 150 mm, 長さ 3,060 mm) を用い、上流から 2,050 mm の位置から下流側に堆積層 (長さ 300 mm) を設けた。堆積層には試料を載せる金網 (目開き 1.6 mm) を取り付け、2 点の圧力測定位置は、堆積層の上下面からそれぞれ 480 mm のところに測定孔を設けた。

#### 4. 測定結果及び考察

##### 1) 有効熱伝導率

##### (1) $Dse$ と $\varepsilon$ , $\lambda e$ の測定結果

図 5 に  $Dse$  に対する  $\varepsilon$  の測定結果を示す。全体的に見ると、 $Dse$  とともに  $\varepsilon$  が増加することがわかる。また、 $Dse$  が小さい場合には  $\varepsilon$  のばらつきは小さいが、 $Dse$  が 30 mm を超えるとばらつきが大きくなる。

図 6 に  $Dse$  に対する  $\lambda e$  の測定結果を示す。全般的に  $Dse$  とともに  $\lambda e$  が増加する傾向が見られる。これは国

井の式で求めた図 1 と同様の傾向を示す。国井の式における試料寸法の適用範囲は 11 mm までであったので、本測定装置で調べた範囲では 40 mm まで適用できることがわかった。 $H=50\text{ mm}$  と  $80\text{ mm}$  での測定値には本質的な違いは見られなかった。各試料での  $\lambda e$  のばらつきは、充てん状態の違い、具体的には  $\varepsilon$  の違いによるものと考えられる。図 6 に関して、各試料の平均値を表 1 と 2 に示す。

木材単一相の熱伝導率に関する文献値<sup>11)</sup>によると、 $20^\circ\text{C}$ 、気乾密度  $500\text{ kg/m}^3$  において  $0.12\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  程度である。本測定値は充てん層に対するもので、空気を占める空気のみで断熱的になるため、文献値の  $\lambda s$  よりも  $\lambda e$  が小さくなることが予想される。そのことを考慮すると、本測定値はやや大きい結果が得られたといえる。

充てん高さの違いについては、 $H$  の増加とともに測定時間が長くなり、例えば、木質ペレットについて  $H=50\text{ mm}$  では 1 時間 40 分に対して、 $80\text{ mm}$  では 2 時間

表 1  $\lambda_e$  の測定結果(測定温度 23°C,  $H=50$  mm)

試料	$D_s$ (mm)	$L_s$ (mm)	$D_{se}$ (mm)	$D_{ve}$ (mm)	$\epsilon$	$\lambda_e$ (W/m K)
木材ペレット	10	25	17.3	15.5	0.455	0.1091
〃	15	15	18.4	17.2	0.434	0.1158
〃	15	37	25.8	23.2	0.507	0.1267
〃	22	22	26.9	25.2	0.427	0.1264
木球	25	-	25.0	25.0	0.487	0.1187
木球	36	-	36.0	36.0	0.506	0.1405
木質ペレット 1	6.2	13	10.0	9.1	0.440	0.1255
木質ペレット 2	6.2	19	11.7	10.3	0.426	0.1328
PMMA ペレット	15	37	25.8	23.2	0.492	0.1247
PMMA 原料樹脂ペレット	3.3, 2.6	3.1	3.7	3.4	0.399	0.1013
大豆	6.8, 5.9	6.6	6.4	6.4	0.462	0.1252

表 2  $\lambda_e$  の測定結果(測定温度 23°C,  $H=80$  mm)

試料	$D_s$ (mm)	$L_s$ (mm)	$D_{se}$ (mm)	$D_{ve}$ (mm)	$\epsilon$	$\lambda_e$ (W/m K)
木材ペレット	10	25	17.3	15.5	0.424	0.1157
〃	15	15	18.4	17.2	0.436	0.1245
〃	15	37	25.8	23.2	0.465	0.1263
〃	22	22	26.9	25.2	0.475	0.1353
〃	22	55	38.1	34.2	0.503	0.1349
〃	30	30	36.7	34.3	0.417	0.1445
〃	30	75	52.0	46.6	0.470	0.1420
木球	25	-	25.0	25.0	0.500	0.1378
〃	36	-	36.0	36.0	0.511	0.1540
木質ペレット 1	6.2	13	10.0	9.1	0.420	0.1408
木質ペレット 2	6.2	19	11.7	10.3	0.417	0.1437
RPF	15.5	46	28.9	25.5	0.536	0.1305
PMMA ペレット	15	37	25.8	23.2	0.453	0.1290

30分となる。試料寸法が 20 mm 程度までの小さい試料については  $H=50$  mm での測定でもよいが、それよりも大きな寸法の試料については  $H=80$  mm での測定が望ましく、さらに 40 mm を超える試料については、より充てん高さ（深さ）が必要であると考えられる。

### (2) 試料の充てん方向の違い

(1)の測定における試料の充てん方法は無作為、ランダムなものである。ここでは、 $\lambda_e$  と試料の充てん方向の関係性を調べるため、試料を水平置きの場合と垂直置きの場合の  $\lambda_e$  を測定した。図 7 に充てんの様子を示す。ここで  $\epsilon$  について、木材ペレット 15×37 mm の水平置きで 0.21、垂直置きで 0.18 であった。同様に、木材ペレット 30×75 mm ではそれぞれ、0.22、0.23 であった。図 8 に測定結果を示す。 $\lambda_e$  は垂直の場合が水平の場合の 2.5 倍大きいことがわかった。すなわち、温度勾配に沿って試料が長手方向に充てんされた場合の  $\lambda_e$  が大き

い。ここで、ランダム充てんで得られた  $\lambda_e$  の平均値を破線で示すと、その  $\lambda_e$  は直線と破線の交点が 15° 程度で、横置きに近いことがわかった。これは、本測定でランダムに充てんしたとしても、ペレットが横置きに充てんされることが多いことを示していると考えられる。

### (3) 空隙率の違い

木球についてランダム充てんのほか、密になるように整えて充てんした場合の  $\lambda_e$  の違いを調べた。図 9 に木球 25 mm の充てんの様子を示す。密に充てんするため、型枠側壁の寸法を調整した。

表 3 に測定結果を示す。測定の結果、密に充てんしようとしても、実際は空隙率が 0.1 小さくなる程度であった。測定結果からは、空隙率が小さくなるとともに  $\lambda_e$  が小さくなる傾向が見られ、国井の式から推算されるものと一致することがわかった。



(a)水平置き (0°), (b)垂直置き (90°)

図7 充てんの様子(木材ペレット 15 mm×37 mm)

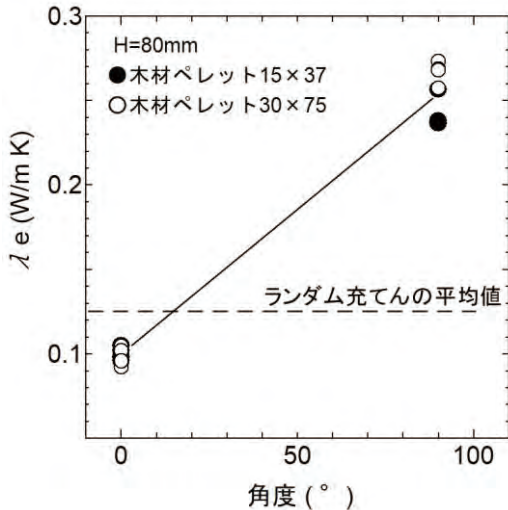


図8 木材ペレットに関する試料角度と  $\lambda_e$  の関係 (測定温度 23°C)

(4)測定温度の違い

木球と PMMA ペレットについて、測定温度 23°C のほか、40、70°C における  $\lambda_e$  を調べた。ここでの PMMA ペレット  $D_{se}=25.8$  mm のもので、ほぼ同じ直径を有する試料を用いた。測定は各温度で 4 回実施し、得られた結果を図 9 に示す。温度とともに  $\lambda_e$  が増加するが、木球の場合は 70°C では逆に減少することがわかった。これは測定温度が高くなると木材が乾燥する影響と考えられる。

2) 比熱

図 10 に  $D_{se}$  に対する  $c_e$  について測定温度を変えて測定した結果を示す。各試料 2 回ずつ測定した。表 4 に平均値を示す。図 10 によると、試料ごとの  $c_e$  のばらつきがあり、おそらく充てん方法、空隙率の影響と考えられる。同じ試料である木材ペレットについて見ると、 $D_{se}$  とともに  $c_e$  がやや減少する傾向が見られなくもないが、本質的な違いはないその差は小さい。 $\lambda_e$  に比べて  $D_{se}$  に対する  $c_e$  の変化は小さく、 $c_e$  は 2.0 J/g K 付近に集中している。

文献<sup>11)</sup>によると、木材の全乾状態での比熱の実測値は 1.360 J/g K で、含水率により最大で 1.770~1.900 J/g K になるという。本測定の充てん層の場合には、単一固体の比熱よりもやや大きい値であった。また、PMMA の比



図9 木球 25mm の充てんの様子

表3 木球に関する充てん方法による  $\lambda_e$  の違い (測定温度 23°C)

試料	$\epsilon$	$\lambda_e$ (W/m K)
木球 25 mm 径	0.437 本測定での最密充てん	0.131
	0.500 ランダム充てん	0.138
木球 36 mm 径	0.410 本測定での最密充てん	0.149
	0.511 ランダム充てん	0.154

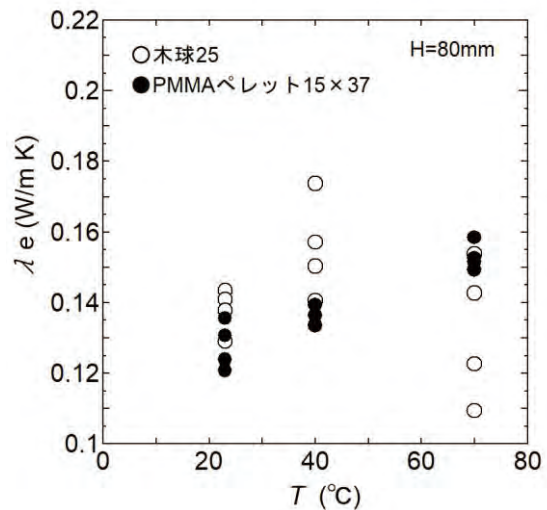


図10 測定温度  $T$  と  $\lambda_e$  の関係

熱については 1.47 J/g K<sup>12)</sup> という文献値がある。木材に比べて PMMA の比熱が小さい傾向は、本測定の充てん層でも同様である。

3) 圧力損失

図 12 に  $V_{in}$  と  $\Delta P$  の測定結果を示す。ここで  $\Delta P$  は単位長さあたりの圧力減少分である。測定値に併せて、 $e$  から Erugun の式<sup>8)</sup>で推算した値を直線で示す。

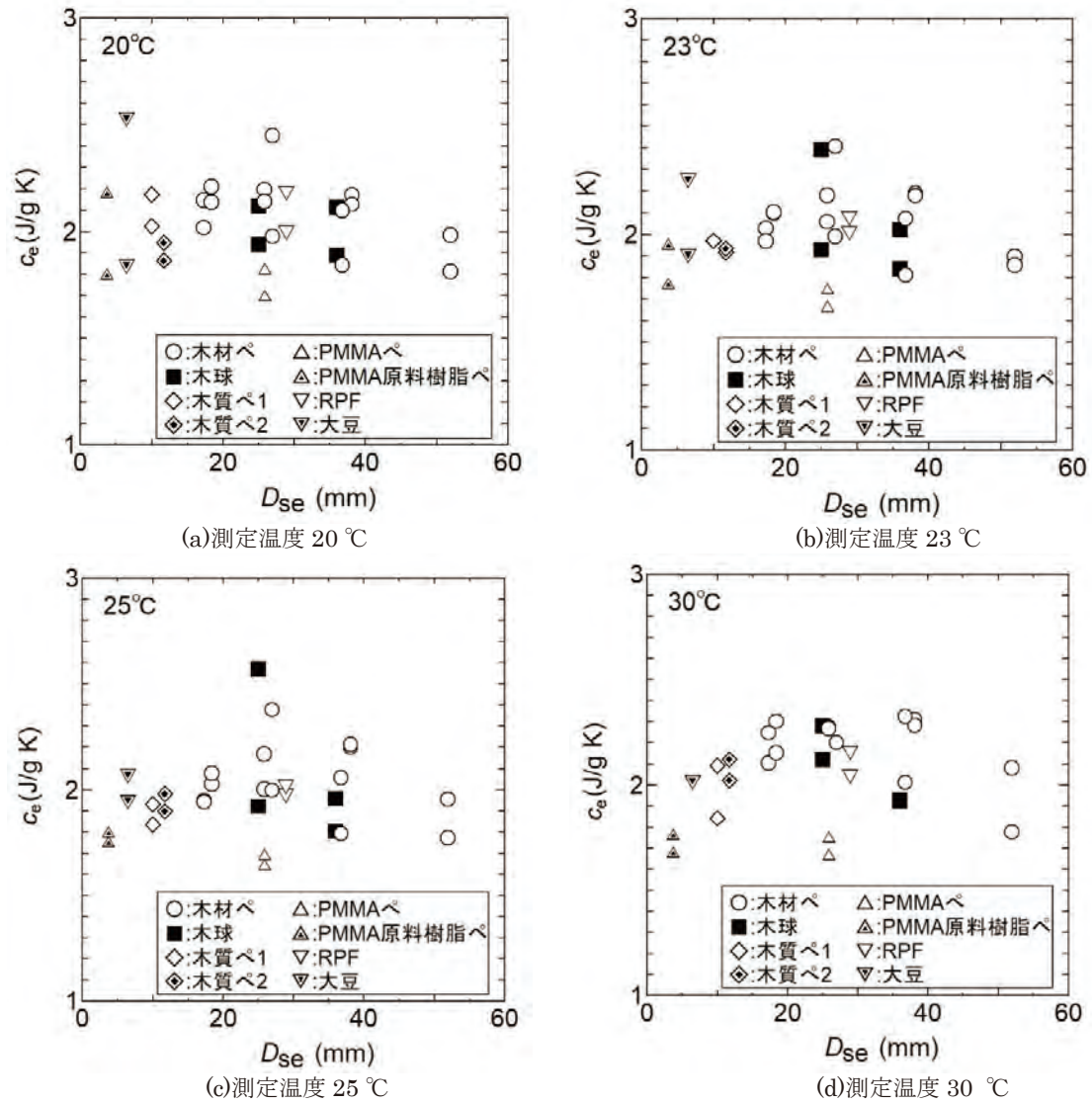


図 11  $D_{se}$  と  $c_e$  の関係

表 4 比熱の測定結果 (平均値, 測定温度 23°C)

試料	$D_s$ (mm)	$L_s$ (mm)	$D_{se}$ (mm)	$D_{ve}$ (mm)	$\epsilon$	$c_e$ (J/g K)
木材ペレット	10	25	17.3	15.5	0.417	1.998
〃	15	15	18.4	17.2	0.404	2.101
〃	15	37	25.8	23.2	0.446	2.119
〃	22	22	26.9	25.2	0.435	2.199
〃	22	55	38.1	34.2	0.480	2.184
〃	30	30	36.7	34.3	0.421	1.942
〃	30	75	52.0	46.6	0.440	1.877
木球	25	-	25.0	25.0	0.482	2.159
〃	36	-	36.0	36.0	0.483	1.929
木質ペレット 1	6.2	13	10.0	9.1	0.388	1.970
木質ペレット 2	6.2	19	11.7	10.3	0.390	1.926
RPF	15.5	46	28.9	25.5	0.551	2.050
PMMA ペレット	15	37	25.8	23.2	0.428	1.699
PMMA 原料樹脂ペレット	3.3, 2.6	3.1	3.7		0.351	1.856
大豆	6.8, 5.9	5.9	6.6	6.4	0.427	2.013

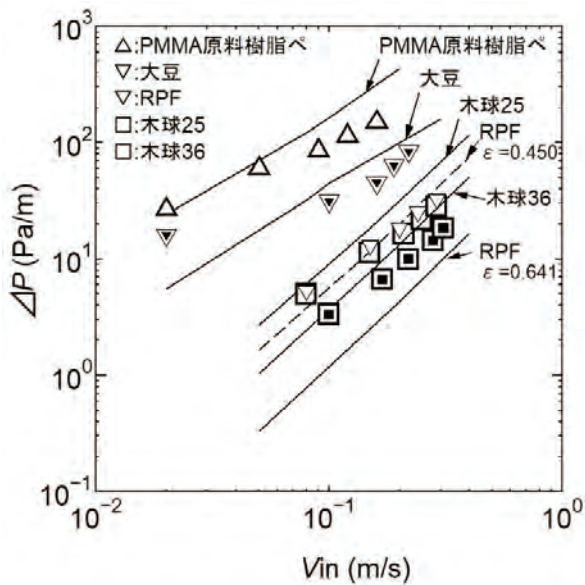


図 12 堆積層の圧力損失

$$\frac{-\Delta P}{L} = 150 \frac{\mu \bar{u} (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d_p^2} + 1.75 \frac{\rho \bar{u} (1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 d_p} \quad (3)$$

ここで、 $L$ は充てん層の長さ、 $\mu$ は粘性係数、 $\rho$ は密度、 $\bar{u}$ は空塔速度、 $d_p$ は粒子径である。

$V_{in}$  と  $\Delta P$  は両対数表記では直線的に変化することがわかる。また、PMMA 原料樹脂ペレットや大豆など、試料寸法が小さいと  $\Delta P$  が大きいこともわかる。圧力損失が大きくなると強制対流場であっても流れにくくなる。大豆については、流速が小さくなると圧力損失の減少割合が小さい傾向が見られた。これは、大豆の形状が楕円体に近いことと、表面粗さの影響と考えられる。 $V_{in}$  が  $0.01 \sim 0.05$  m/s の低流速範囲での  $\Delta P$  は  $10$  Pa/m を超え、堆積層内の流れは抑制される。

このほか、RPF については実測値の  $\varepsilon$  が  $0.641$  のより推算した値と大きくことなるため、 $\varepsilon=0.45$  として計算すると測定値と推算値がよく一致することがわかった。RPF については長さのばらつきが大きく、そのことが  $D_{se}$  や  $\varepsilon$  を求める際のばらつきに影響した考えられる。

#### 4) 有効熱伝導率・比熱と燃え拡がり速度

くん焼における燃え拡がり速度  $V_b$  は一般に次式のような関係で表される<sup>12)</sup>。

$$V_b \propto \{ \lambda_s / (\rho_s c_s) \} \cdot 1/\delta \quad (4)$$

ここで、 $\rho_s$  と  $c_s$  はそれぞれ固体の密度と定圧比熱、 $\delta$  は熱貫通距離である。充てん層での場合の燃え拡がりでは  $\lambda_s$  を  $\lambda_e$  に置き換える。 $\rho_s$  と  $c_s$  は流体と固体のバルク体として式(1)と同様に  $\varepsilon$  で表すことができるが、固体の大きさや形状には依らない。本研究と同じ寸法の木材ペレットを用いた上方あるいは下方の燃え拡がり実験<sup>7)</sup>においては、 $V_b$  は  $D_{se}$  あるいは  $D_{ve}$  に対して  $1 \sim 8$  mm/min の範囲で変化したが、本実験の  $\lambda_e$  の  $D_{se}$  に対

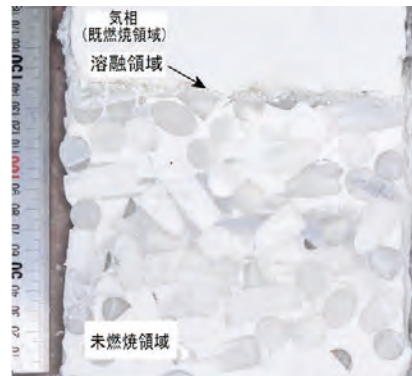


図 13 PMMA ペレット堆積層の下方燃え拡がりにおける断面の様子 (石こう固化)<sup>13)</sup>



図 14 PMMA 原料樹脂ペレット堆積層の上方燃え拡がり途中で水消火後の堆積層断面の様子<sup>14)</sup>



図 15 大豆堆積層の下方燃え拡がりの様子 (その後、消えて燃え拡がらなかった)

する変化は  $0.1157 \sim 0.1445$  W/(m · K) であり、20%の増加に過ぎないことがわかった。 $V_b$  は  $\delta$  にも依存するが、むしろ、 $\lambda_e$  の影響が大きいと推測される。おそらく、 $\lambda_e$  に関して、静止気流中での値に流れを伴う場合の影響を加えて考慮すべきであることを示唆する結果である。

#### 5) 圧力損失と空気流、燃え拡がりの関係

ここで、圧力損失と空気流と燃え拡がりの関係について PMMA ペレット、大豆、木材ペレットの堆積層の燃え拡がり実験の結果とともに述べる。

PMMA ペレット堆積層の下方燃え拡がり実験によると、堆積層の上面で着火後、下方に向かって燃え拡がりが継続することがわかっている。層上面に火炎が形成し

た状態では火炎からの熱で層上面の PMMA が溶融し、溶融膜（溶融領域）が全面を覆うようになる（図 13）。溶融膜は層内への空気の流れを遮断する。燃え広がりを維持する新鮮な空気は、層の上方（火炎の外側）からの流入による。そのため、PMMA の試料径や空隙によらず、燃え広がり速度が一定となる。すなわち、下方燃え広がりでは堆積層の圧力損失の影響は小さい。図 14 に示す下面が閉じた場合の上方燃え広がり実験<sup>14)</sup>によると、加熱面（底面）から 4.3 mm まで完全に溶融して液体となり、それよりも上方 36~55 mm が部分的に溶融して固化する。層の隙間を溶融膜で覆ってしまうため、熱分解ガスが層の上方に流動できなくなる。すなわち、加熱面付近では PMMA は溶融するが、くん焼の様式で燃焼しないため、燃え広がらない。

大豆堆積層の下方燃え広がり実験によると、下面が閉じた場合には、燃え広がりが継続しなかった（図 15）。加熱面上に堆積する、下面が閉じた場合の上方燃え広がりも継続しなかった。大豆についてはくん焼の様式で燃え広がるので、燃焼を維持できるだけの層内の空気の流れが重要である。

木材ペレットの燃え広がり実験<sup>7)</sup>によると、堆積層へ対向する空気流速は実測で 10 cm/s 程度で、この値から推算される空気の流量は、完全燃焼には不十分ではあるが、くん焼を維持できるだけの量であることがわかっている。くん焼における燃え広がり可否について、空気流速 10 cm/s を一つの基準とすると、それに対する $\Delta P$ は 20~30 Pa/m を超えるような堆積層では燃え広がりを持続できず、消炎することが推測される。これは以前の実験の木材ペレット 6.5×6.5 mm ( $D_{se}=7.3$  mm) では 30 Pa/m で燃え広がらないが、木質ペレット 6.5×16 mm ( $D_{se}=10.7$  mm) 18~20 Pa/m で燃え広がる結果とも一致する。しかし、実際の火災では堆積層が崩落したりして堆積層の隙間が大きくなって、空気が流入しやすい状態になると、くん焼から火炎を形成する有炎燃焼にせん移し、消炎せずに火災が拡大する可能性に留意しておく必要はある。

## 5. まとめ

本研究では、堆積層における基本的な特性データの収集を目的に、空隙率に対する有効熱伝導率、比熱、通気性に影響する圧力損失を測定した。有効熱伝導率の測定は JIS A 1412, ISO 8301 などの規格に準拠するもの定常法により行った。試料としては、木球や木材ペレット、RPF（プラスチック・紙ごみ固形化燃料）、PMMA、大豆を用いた。ペレット試料の寸法を相当直径で整理した。得られた結果は次のとおりである。

① 有効熱伝導率  $\lambda_e$  は試料寸法とともに増加することがわかった。これは従来からの推算式の傾向に位置する。

- ② 本測定装置では充てん高さが 100 mm まで測定できるが、試料の面積等価直径  $D_{se}$  が 40 mm を超えるものの測定には適さないことがわかった。
- ③ みかけの比熱  $c_e$  の試料寸法への依存性は小さいことがわかった。
- ④ 圧力損失 $\Delta P$  は試料寸法が小さいものほど大きくなり、両対数表記では流速と圧力損失は直線的に変化することがわかった。傾向は Ergun の理論式と一致する。ただし、理論式には適切な空隙率を用いる必要がある。
- ⑤ 燃え広がり速度を推算する上では、 $\lambda_e$  に対流の影響を考慮すべきであることがわかった。
- ⑥ くん焼の様式で燃え広がる試料については、堆積層の圧力損失が 20~30 Pa/m を超えると、自然対流による堆積層内の空気の流通が不十分で燃焼を維持できずに消炎することが推測される。

## 参 考 文 献

- 1) (一社)日本粉体工業技術協会 粉じん爆発委員会編. 粉じん爆発・火災の安全対策. オーム社. 2019; 152.
- 2) James G. Quintiere, 大宮喜文・若月薫 (訳). 基礎火災現象原論. 共立出版. 2009; 第 5 章.
- 3) 日本機械学会編. 伝熱工学資料 (改訂第 5 版). 丸善. 2009; 185-186.
- 4) 粉体工学会編. 粉体の反応. 日刊工業新聞社. 2007; 50-59.
- 5) Kaviany, M. Principles of heat transfer in porous media, 2nd Ed. Springer. 1995; Chap.3.
- 6) 粉体工学会編. 粉体の基礎物性. 日刊工業新聞社. 2005; 3.
- 7) 八島正明. 木材ペレット堆積層内の燃え広がりに関するペレット寸法の影響. 日本火災学会論文集. 2013; 63 2: 37-48.
- 8) 化学工学会編. 基礎化学工学. 培風館. 1999; 196-199.
- 9) JIS A 1412-2:1999 熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法- 第 2 部: 熱流計法 (HFM 法).
- 10) ISO 8301:1991 Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus.
- 11) 日本熱物性学会編. 新編熱物性ハンドブック. 養賢堂. 2008; 233-235, 310-311.
- 12) Drysdale, D. An introduction to fire dynamics, 2nd Ed. John Wiley & Sons. 1998; 277.
- 13) 八島正明. RPF, PMMA ペレット堆積層内の燃え広がり・石こう固化による層内部の観察. 第 51 回安全工学研究発表会講演予稿集. 2018; 129-130.
- 14) 八島正明. 粉体層内の燃え広がり時に発生するガス蒸気の着火性. 第 52 回安全工学研究発表会講演予稿集. 2019; 203-206.