HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	流動層炉における固形廃棄物の燃焼時間の推算
Author(s)	喜多, 照行; 杉山, 秀子; 神谷, 秀博 他
Description	第2回衛生工学シンポジウム（平成6年11月10日（木）-11日（金） 北海道大学学術交流会館） . 3 有効利用、高度処理、廃棄物処理 . 3-8
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 2, 115-120
Issue Date	1994-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7595
Type	departmental bulletin paper
File Information	2-3-8_p115-120.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

３－８

流動層炉における固形廃棄物の燃焼時間の推算

喜多照行（タクマ），杉山秀子，神谷秀博，堀尾正靱（東京農工大・工）
熊田雅行，片岡静夫（タクマ）

1. 緒言

近年、都市ごみなどの廃棄物の排出量は急増し、廃プラスチックなど高カロリー物質の占める割合が多くなっている。このような多量の高カロリー廃棄物については、単に焼却するだけでなく熱なり電気エネルギーとしてエネルギーをリサイクルして利用しようとする動きがある。廃棄物からエネルギーをクリーンに効率良く取り出すためにも、廃棄物の燃焼、および有害成分排出特性を把握し、廃棄物燃焼ボイラーの燃焼状態を制御する必要がある。

固形燃料の燃焼に関する従来の研究は、石炭を中心に進められてきており、雑多な組成と複雑な形状を有する廃棄物の流動層中での燃焼に関する研究は少ない。また廃棄物の場合、形状は塊状から膜状まで多様であり燃焼特性におよぼす形状の効果は石炭の場合よりもさらに重要であると考えられる。

そこで本研究では、流動層炉で円柱型のモデル廃棄物（木材、ポリエチレン、ポリスチレン）を用いて、円柱の直径と長さの比を変化させて形状による燃焼特性の変化を、着火、揮発分燃焼、固定炭素分燃焼に分けて検討し、各燃焼過程のモデル化を試みた。さらに、いくつかの形状、材質の違うモデルごみ数種を燃焼し、モデルの妥当性を検討した。

2 実験装置および実験方法

本研究で用いた実験装置を図１に示す。流動層炉は、内径５６．６㎜の石英ガラス製二重管電気炉で内部に石英ガラス製の焼結板分散板を設けてある。透明電気炉によってモデルごみの燃焼状態を直接観察した。

実験は、空気量、炉内温度を所定の値に設定し、定常状態になった後に、炉上部よりバッチ形式でモデル廃棄物を投入し、着火時間、揮発分燃焼時間、固定炭素分燃焼時間を目視により観測した。ただし、着火時間、揮発分燃焼時間、固定炭素分燃焼時間はつぎのように定義した。

着火時間	：炉内投入後から物体が着火、発光するまでの時間
揮発分燃焼時間	：着火後、火炎が消滅するまでの時間
固定炭素分燃焼時間	：揮発分燃焼終了時から、チャー燃焼が終了して物体表面温度が層内温度と等しくなり、チャー表面が明るく見えなくなるまでの時間

実験に用いた媒体粒子はけい砂で、d_p＝５００μm、ρ_p＝２４６０kg/m^{3}である。流動化開始速度は、u_{mf}＝０．０９１m/s（９２３K）であった。静止層高は、１００㎜とした。空塔速度は、流動化開始速度の２倍とした。層内温度は９２３Kを基準に一部１０７３Kでも行った。酸素濃度は２１％で実験を行った。

円柱型ごみでの燃焼モデル廃棄物としてはすべて直径２０㎜の球と同体積にした木材、ポリエチレンおよびポリスチレンを用いた。円柱の形状係数は円柱の直径（D）と長さ（L）の比の関数として次式で与えられる。

$$\phi_s = \left(\frac{\text{surface area of volume equivalent sphere}}{\text{surface area of cylinder}} \right) = (18)^{1/3} \frac{(D/L)^{1/3}}{(D/L)+2} \qquad (1)$$

上式の関係を図２に示す。直径２０㎜の球と同体積の場合、円柱の直径１７㎜でD／L＝１となり形状係数は極大値をとり最も球に近づく。形状係数が同じでも棒（D＜L）または円盤（D＞L）状の場合があるの

で両方について検討を行った。この他、球、立方体、柱状、および板状で、d_s＝5.35～22.5mmのサイズの廃棄物の燃焼時間を調べた。木材、天然ゴム、ポリエチレン、ポリスチレン、ポリプロピレン、PET、ABS樹脂製モデル廃棄物の性状を表1に示す。

3. 結果と考察

3.1 揮発分燃焼特性

揮発分燃焼には、揮発分が放出して燃焼したあと固定炭素分が残る場合、物体が収縮しながら揮発分が放出し燃焼したあと固定炭素分が残らない場合の2通りが見られた。そこで、以下、前者にチャー層内に安定した温度分布が短時間に形成される擬定常と仮定する未反応殻型（揮発分未放出殻）伝熱モデルを、また後者に燃料収縮伝熱モデルを適用し、揮発分燃焼における形状、サイズの影響を理論的に調べる。揮発分燃焼が粒子層から廃棄物への伝熱律速で行われると仮定すると、揮発分の燃焼速度は揮発分の熱分解速度と同じになり、物体の入熱はすべて揮発分の蒸発に用いられる。また揮発分を放出している部分の温度は熱分解温度に保たれるとする。揮発分燃焼速度r_{dv}[kg/s]はそれぞれ次式のように表される。

$$r_{dv}=\frac{\pi\rho_s X_{v0}}{6}\frac{d\left(d_{sc}^{\ 3}\right)}{dt}=\frac{-\pi(T_{bed}-T_{dv})}{\phi_s(-\Delta H)_{dv}\left\{1/h_{ss}d_{s0}^{\ 2}+1/k_s\left(1/d_{sc}-1/d_{s0}\right)\right\}} \quad \text{（チャー層形成のとき）} \quad (2)$$

$$r_{dv}=\frac{\pi\rho_s X_{v0}}{6}\frac{d\left(d_{sc}^{\ 3}\right)}{dt}=\frac{-h_{ss}\pi d_{sc}^{\ 2}(T_{bed}-T_{ss})}{\phi_s(-\Delta H)_{dv}} \quad \text{（チャー層を形成しないのとき）} \quad (3)$$

ここでρ_S：物体密度[kg/m^3]、X_{V0}:初期揮発分[wt%]、d_{S0}：初期物体径[m]、d_{SC}:未反応殻径（揮発分未放出殻径）[m]、$(-\Delta H)_{dv}$:揮発分の熱分解および蒸発潜熱[J/kg]、T_{bed}：層温度[K]、T_{dv}：熱分解温度[K]、T_{SS}：物体表面温度[K]、k_S:物体の熱伝導度[W/(m･K)]、h_{SS}:物体表面と流動層間の伝熱係数[W/(m^2･K)]である。

上式で用いた伝熱係数h_{SS}は、つぎのTsukada-Horio(1991)の式[1]により求めた。

$$Nu_{s,\max}=h_{s,\max}d_s/k_e=(d_s/d_p)^{0.8} \quad (4)$$

ただしk_eは粒子濃厚層の有効熱伝導度[W/(m･K)]である。

式(4)を式(3)に代入し式(2)、(3)を$t=0\sim t_{dv}$, $d_{sc}=d_{s0}\sim 0$で積分し整理すると揮発分燃焼時間t_{dv}は次式で与えられる。ただしT_{dv}、$(-\Delta H)_{dv}$はここでは一定と仮定して積分した。

$$t_{dv}=\frac{\rho_s X_{v0}\phi_s}{2(T_{bed}-T_{dv})}\left(\frac{d_{s0}}{3h_{ss}}+\frac{d_{s0}^{\ 2}}{6k_s}\right) \quad (5)$$

$$t_{dv}=\left(\frac{\rho_s(-\Delta H)_{dv}X_{v0}d_p^{\ 0.8}}{2.4k_e(T_{bed}-T_{ss})}\right)\cdot\phi_s\cdot d_{s0}^{\ 1.2} \quad (6)$$

上式によりt_{dv}の形状依存性についてはどちらのモデルでも$t_{dv}\propto\phi_s$の関係となり、粒径への依存性については未反応殻型伝熱モデルでチャー層を形成しないときは$t_{dv}\propto d_{s0}$、チャー層を形成するときは$t_{dv}\propto d_{s0}^{\ 2}$の関係となる。また燃料収縮伝熱モデルでは揮発分燃焼速度は流動層と物体表面との伝熱律速となり$t_{dv}\propto d_{s0}^{\ 1.2}$の関係となる。

図3、4、5にそれぞれポリエチレン、ポリスチレン、および木材について、層温度９２３K、空塔速度u_0=２u_{mf}、２１%O_2で形状を変化させた時の揮発分燃焼時間を示す。サンプルはすべて直径２０㎜の球と同体積である。白丸は円盤状のサンプルで、黒丸は棒状のサンプルを示す。ポリエチレンおよび木材の場合、揮発分燃焼時間は形状係数の増加とともに増加した。しかし、ポリスチレン（図4）では、形状係数が小さく薄い円盤状になると燃焼時間が長くなった。これは燃焼途中で物体が溶融して丸くなり伝熱面積が小さくなって燃焼時間が長くなったものと考えられる。形状係数が０．５と０．８５では揮発分燃焼時間は約１００秒も違った。また揮発分の燃焼時間は棒状、円盤状によらず形状係数だけで整理することができた。

式⑸、⑹より同材質、同サイズの物体を燃焼すると形状係数と燃焼時間は比例関係となるが、図3、4、5に示すように燃焼時間は形状係数に依存しているが完全な比例関係にならなかった。これは揮発分燃焼過程において、収縮、溶融等により形状が変化したためであると考えられる。

つぎに球、立方体、柱状、および板状で、サイズの異なる木材、天然ゴム、ポリエチレン、ポリプロピレン、ＰＥＴ、ＡＢＳ樹脂製のモデル廃棄物を流動層炉に投入し燃焼実験を行った。図6に木材、図7にプラスチック類の揮発分燃焼時間と物体径d_sの関係を示す。T_{bed}=９２３K、T_{dv}=５２３Kでの輻射による伝熱係数はｈ=８０ W/㎡K、ラワンの熱伝導率k_s=０．１６ W/(m･K)、d_s=１０㎜とすると木材のＢｉ数($Bi = h_s d_s / k_s$)は5となり、物体内の伝熱抵抗が大きく、物体内の熱伝導による伝熱律速となる。図6より$t_v \propto {d_{s0}}^2$の関係が成立しており、木材の揮発分燃焼はチャー層を考慮した未反応殻型伝熱モデルで表現ができることが確認できた。また図７に示すようにプラスチック類の揮発分燃焼時間と物体径の間には$t_v \propto {d_{s0}}^{1.2}$の関係が成立しており燃料収縮伝熱モデルによってプラスチック類の揮発分燃焼を表現できることがわかる。

3.2 固定炭素分燃焼特性

チャー燃焼速度r_c[kg/s]は、表面に灰層が残らないとすると石炭の場合と同様に次式のように表される。

$$r_c = \frac{\pi}{6}\rho_s X_{c0}\frac{d\,{d_s}^3}{dt} = -\frac{1}{\phi_s}M_c \pi {d_s}^2 \bar{k} C_{O_2} \qquad (7)$$

ただし $k = 1/k_f + 1/k_c$：総括反応係数[m/s]、C_{O2}：酸素濃度[kmol/m3]、X_C：固定炭素分[-]、M_C：炭素の分子量[kg/kmol]である。上式を化学反応律速の場合、物質移動律速の場合についてそれぞれ$d_s = d_{s0} \sim 0$, $t = 0 \sim t_C$で積分するとチャー燃焼時間t_c[s]は以下のようになる。

化学反応律速の場合

$$t_C = \frac{1}{2M_c k_c C_{O_2}} X_c \rho_s d_{s0}\,\phi_{s0} \quad \propto X_c \rho_s d_{s0}\phi_{s0} \qquad (8)$$

物質移動律速の場合

$$t_C = \frac{1}{8M_c \varepsilon_{mf} D C_{O_2}} X_c \rho_s {d_{s0}}^2 \phi_s \quad \propto X_c \rho_s {d_{s0}}^2 \phi_s \qquad (9)$$

以上より$t_C \propto X_c \rho_s \phi_s {d_{s0}}^2$が成り立つ場合には物質移動律速、$t_C \propto X_c \rho_s \phi_s d_{s0}$が成り立つ場合には化学反応律速と判断できる。図8に廃棄物のチャー燃焼時間の実測値を示す。木材、天然ゴムのチャー燃焼は約2乗の関係になっており、物質移動による律速である考えられる。

つぎにベッド温度９２３K、空塔速度u_0=２u_{mf}、２１%O_2で木材を燃焼させた場合のチャー燃焼時間と

形状係数の関係を図９に示す。木材のチャー燃焼時間と形状の関係にはかなりばらつきが見られる。これはチャー燃焼過程で亀裂の形成や割れにより形状の影響が低減されたのではないかと考える。

4. 結論

流動層炉での廃棄物の形状による燃焼特性の変化を検討するため、同材質、同体積の円柱型モデル廃棄物を用い形状係数を連続的に変化させて、燃焼時間を測定した。つぎに揮発分、およびチャー燃焼特性について理論的考察を行い、得られたモデルの妥当性を実験的に検討した。この結果以下の結論が得られた。

1）廃棄物の揮発分燃焼において未反応殻型（揮発分未放出殻）伝熱モデル、燃料収縮伝熱モデルの２つのモデルを提案し、モデルの妥当性を木材、プラスチック類の燃焼実験で確認した。

2）同材質、同体積のモデルごみでは揮発分燃焼時間は形状係数に依存し、形状係数を０．５から０．８５に変化させた場合、揮発分燃焼最大時間は最小時間の約３倍長くなった。本研究で提案したモデルでは揮発分燃焼時間は形状係数に比例するが、木材、およびポリエチレンではϕ_sが大きくなるほど長くなる傾向が見られた。また、ポリスチレンでは溶融等により形状が変化するためか、ϕ_sのある値でt_{dv}が最小値を示した。

3）木材のチャー燃焼時間と形状の関係にはかなりばらつきが見られた。本研究で用いた木材、天然ゴムについては物質移動律速であることが確認された。

引用文献

(1) Tsukada, M. and Horio, M. 1992 Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 31, No. 4, p. 1147.

(2) 日本機械学会編:燃焼の設計, オーム社, (1990) 168

記号

C_{O2}	: O_2濃度	[kmol/m^3]	m_0	: 投入初期の物体の質量	[kg]
d_{s0}	: 初期物体径	[m]	T_{bed}	: 層温度	[K]
d_{sc}	: 未反応殻径（揮発分未放出殻径）	[m]	T_{dv}	: 熱分解温度	[K]
d_{sph}	: 物体と同一体積の球の直径	[m]	t_c	: 固定炭素分燃焼時間	[s]
D	: 円柱の直径	[m]	T_{ss}	: 物体表面温度	[K]
h_{ss}	:物体表面と流動層間の伝熱係数	[W/(m^2·K)]	t_{dv}	: 揮発分燃焼時間	[s]
L	: 円柱の長さ	[m]	u_{mf}	: 流動化開始速度	[m/s]
$k = 1/k_f + 1/k_c$	: 総括反応速度	[m/s]	u_0	: 空筒速度	[m/s]
k_c	: 化学反応速度定数	[m/s]	X_c	: 固定炭素分	[%]
k_e	: 粒子濃厚層の有効熱伝導度	[W/(m·K)]	X_{v0}	: 初期揮発分	[wt%]
k_f	: 物質移動係数	[m/s]	ρ_p	: 媒体粒子の密度	[kg/m^3]
k_s	: 物体の熱伝導度	[W/(m·K)]	ρ_s	: 物体密度	[kg/m^3]
M_c	: 炭素の分子量	[kg/kmol]	ϕs	: 形状係数	[-]
r_c	: 固定炭素分燃焼速度	[kg/s]	$(-\Delta H)_{dv}$	: 揮発分の蒸発潜熱	[J/kg]
r_v	: 揮発分燃焼速度	[kg/s]			

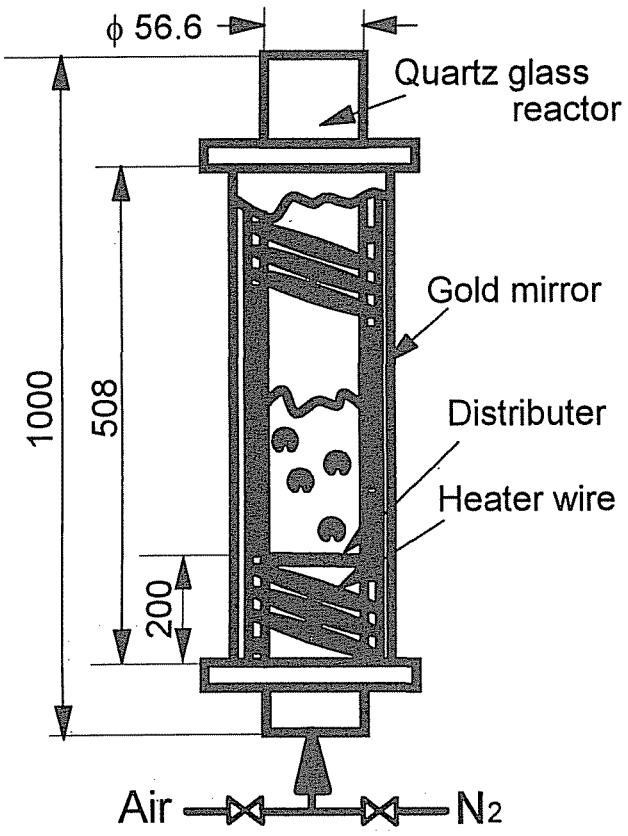

Fig. 1 Experimental apparatus

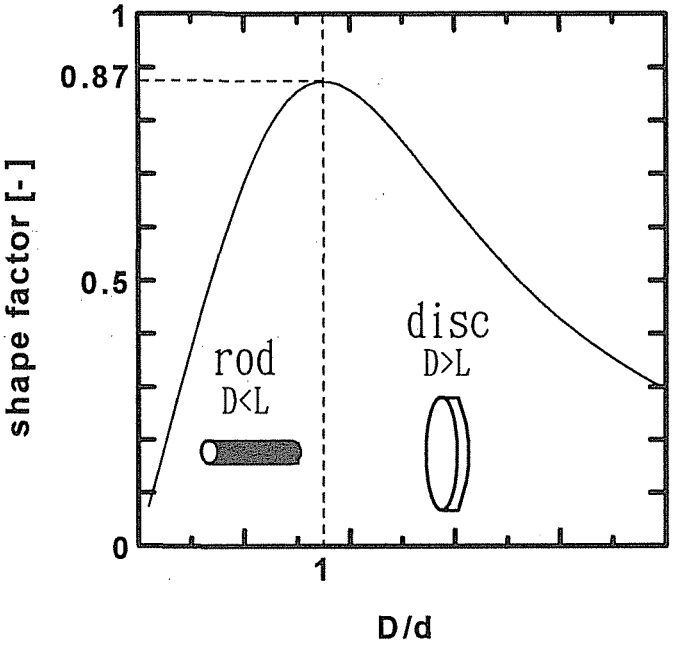

Fig. 2 D/d and shape factor of a cylinder

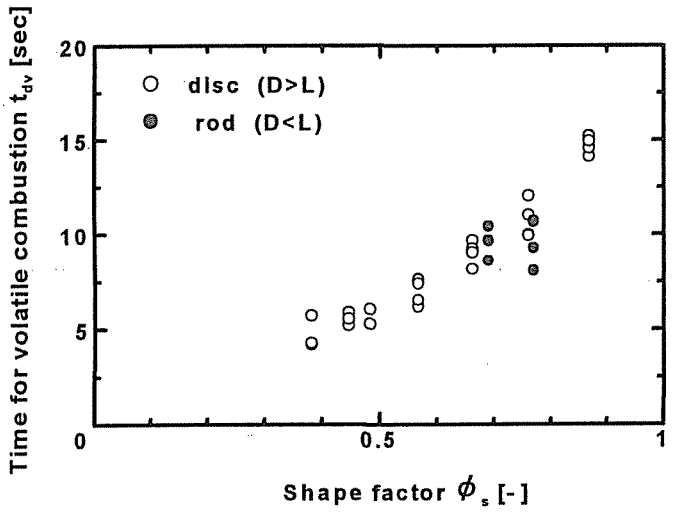

Fig. 3 Shape factor vs.time for volatile combustion of polyethlene (923K, $2u_{mf}$, 21%O_2)

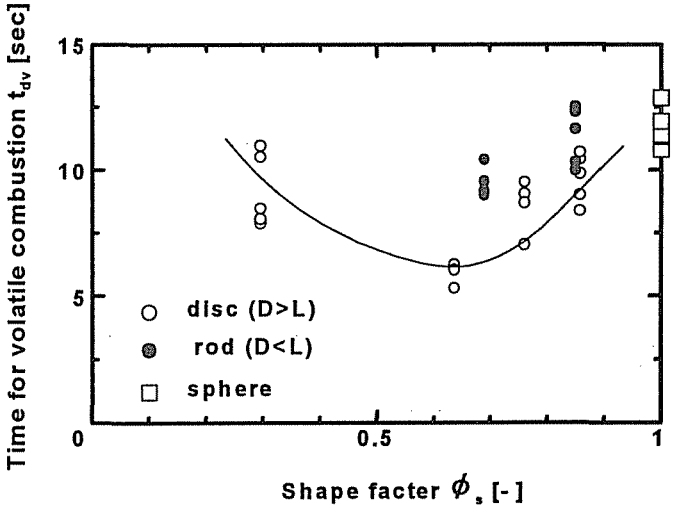

Fig. 4 Shape facter vs.time for volatile combustion of polystyrene (923K,$2u_{mf}$,21%O_2)

Table 1 Characteristics for modeled waste

	moisture wt%	volatile wt%	fixed carbon wt%	ash wt%	high heating value kJ/kg·dry	specific gravity kg/m^3	specific heat kJ/(kg·K)	thermal conductivity W/(m·K)
wood	9.2	77.8	12.7	0.3	2.05E+04	534	1.30	0.16
rubber	6.3	56.6	16.9	20.2	1.85E+04	1550	1.40	0.16
polyethlene	1.0	98.7	0.0	0.3	4.90E+04	35	2.10	0.41
polystyrene	0.5	94.2	5.1	0.2	4.23E+04	49	1.16	0.15
polypropylene	0.0	99.8	0.0	0.2	4.65E+04	863	2.10	0.19
PET	0.0	90.6	8.6	0.9	2.26E+04	1282	2.10	0.41
ABS	0.3	96.4	3.1	0.2	3.93E+04	1196	1.90	0.21

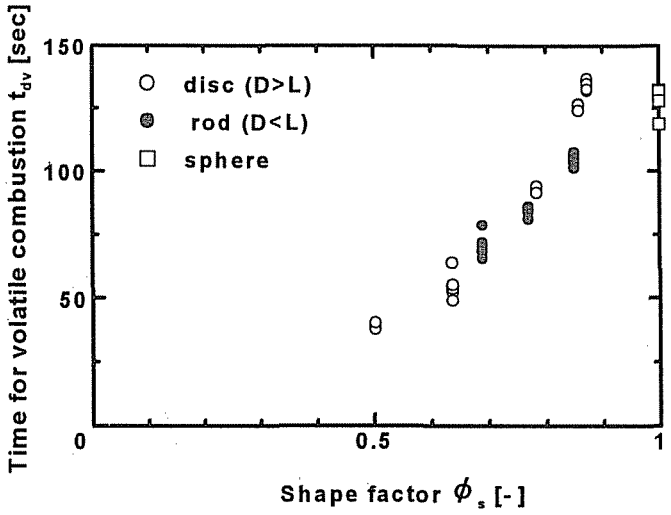

Fig. 5 Shape factor vs.time for volatile combustion of wood

(923K, $2u_{mf}$, 21%O_2)

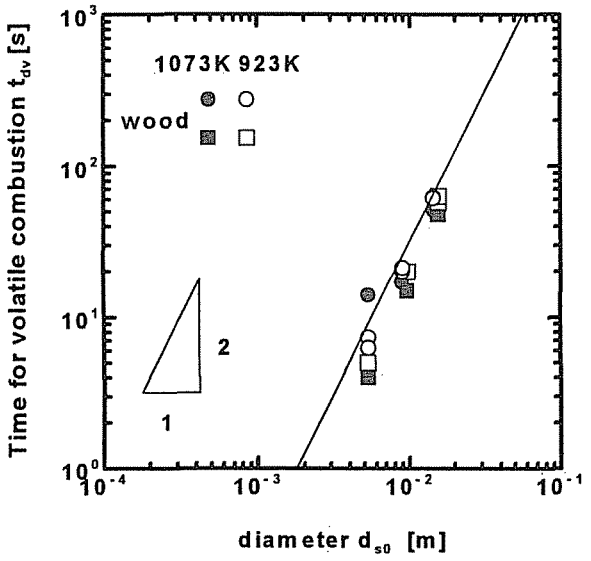

Fig. 6 diameter d_{s0} vs. time for volatile combustion

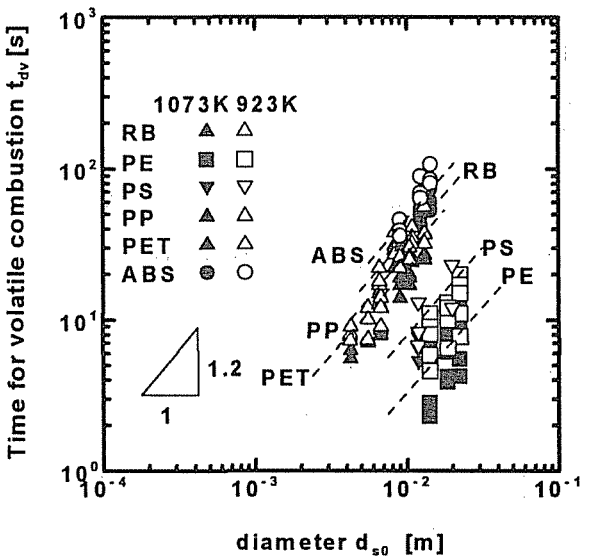

Fig. 7 diameter d_{s0} vs. time for volatile combustion

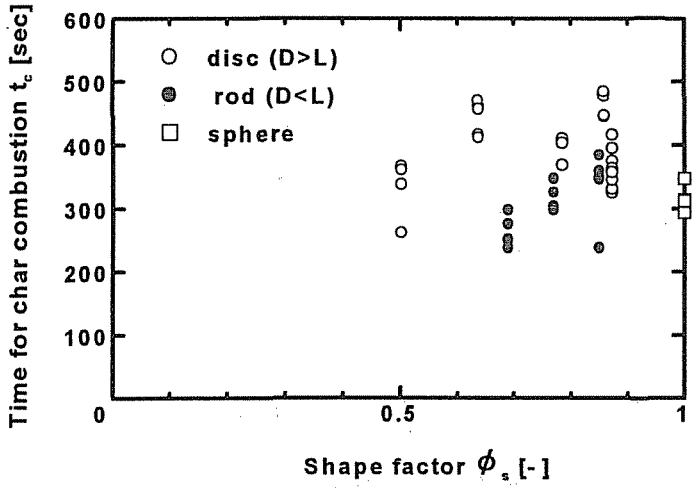

Fig. 8 Shape factor vs.time for char combustion of wood

(923K, $2u_{mf}$, 21%O_2)

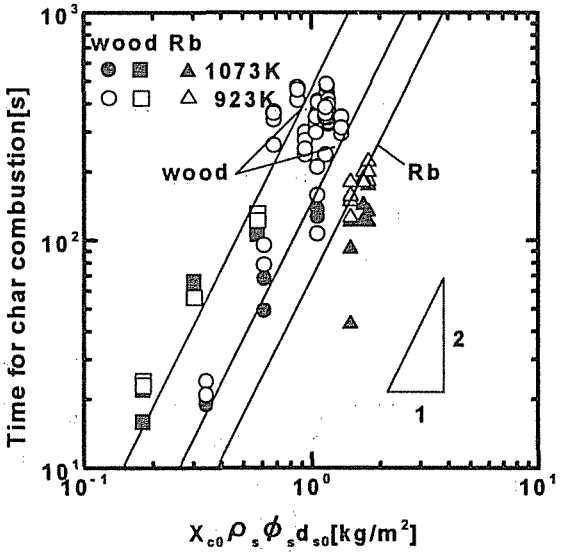

Fig. 9 $X_{c0}\rho_s\phi_s d_{s0}$ vs. time for char combustion