九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

穀粉の熱特性の測定

村田，敏
九州大学農学部農産機械工学講座

宮内，樹代史
九州大学農学部農産機械工学講座

https://doi.org/10.15017/23435

出版情報：九州大學農學部學藝雜誌. 47 (1/2), pp.93-99, 1993-01. 九州大學農學部
バージョン：
権利関係：

九大農学芸誌 (Sci. Bull. Fac. Agr., Kyushu Univ.)
第47巻 第1・2号 93-99 (1992)

穀粉の熱特性の測定

村田 敏・宮内 樹代史
九州大学農学部農産機械工学講座

(1992年7月31日 受理)

Measurement of Thermal Properties of Cereal Grain Powders

Satoshi MURATA and Kiyoshi MIYAUCHI
Laboratory of Agricultural Process Engineering, Faculty of Agriculture,
Kyushu University 46-05, Fukuoka 812

緒 言

パン，麺類，菓子類等，小麦粉やその他の穀粉を原料とする食品は多い．この穀粉を食品に加工する過程には，乾燥，粉砕，貯蔵，熱処理等の諸操作があり，必要な処理装置・施設の設計上，基礎的な資料として，その熱特性が力学的特性と並んで，極めて重要である（坂下，1988）．しかし，力学的特性等の研究報告（青木，1975）は多々あるものの，熱伝導率をはじめとする熱特性についてはあまり例をみない．数少ない測定データにおいても，測定方法や粉体の種類，状態，含水率，かさ密度，温度などに左右され，使用に際してのその数値は概略的にならざるを得ない．そこでこれらの諸条件を考慮し，データを蓄積することが急務となっている．

本研究では，最近よく見られる真空断熱容器を利用する測定方法を考案し，7種類の穀物粉体について熱伝導率，温度伝導率および比熱の熱特性を測定したのでその結果について報告する．

なお，本実験に供試した材料を提供していただいた鳥越製粉㈱，ならびに本測定装置の製作にご協力下さった，九州大学農学部堀善昭技官に深く感謝致します．

材料と方法

1．供試材料

測定に供試した材料は小麦粉3種（薄力粉，中力粉，強力粉），ライ麦粉，米粉，脱脂大豆粉，コーンスターチの7種類の穀物粉体である．Table 1に材料の特性値を示す．水分は105°C-5時間法，真密度はエアーピクノメータ法，かさ密度はブラウエル穀粒天秤により測定し，空隙率は真密度とかさ密度から算出した．

2．測定装置

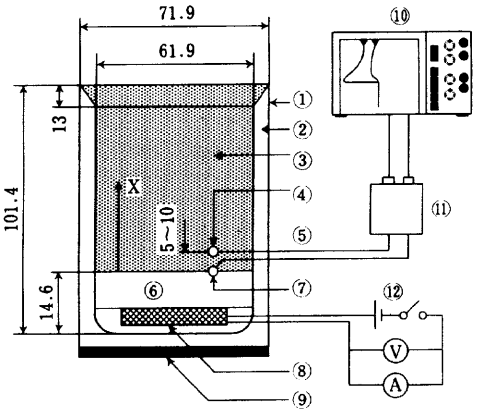
測定装置の概略図をFig.1に示す．試料容器にはステンレス製真空断熱カップ（日本酸素製，JMA-300, 300ml, ϕ60mm）を用いた．このカップは側面および底面が真空断熱されており，保温効果（室温20°Cの無風状態において，カップに熱湯を満水より約1cm下の位置まで満たし，その温度が95°Cになったときにふたをして1時間放置した場合の温度）が66°Cと極めて高い．側面が断熱されたことにより，熱は熱源から上方向に一様に伝わる．

熱源部は，銅とその温度を上昇させるためのヒーターからなる．銅を用いたのは，被測定物質に比べてその熱伝導率（403W・m^{-1}・K^{-1}, 0°C）が10^3～10^4倍と桁違いに大きく，その内部の温度分布が無視できるためである．Table 2に試作した熱源の諸元を示す．銅板を直径60mm，厚さ10mmに削り，表面（熱を発生させる側）を磨き，裏面にヒーターを装着した．ヒーターは，雲母板にヒーター線（ϕ0.3mmのマンガニン線）を巻き付け，さらにそれを雲母板で挟み，銅ブロックに装着した．その際，銅ブロックと接触する側の雲母はできる限り薄く（0.2mm程度），底部側の雲母はできる限り厚く（1.5mm程度）し，熱が上方向にのみ伝わるよう工夫した．

試料温度測定用熱電対は，素線径0.1mmのものを用い，これをセラミック管を通し，ストッパーをつけることにより，カップの上部から一定の深さを保てるようにした．管の長さを変えたものを数本作製し，これらを使い分け，熱源からの距離を一定（5mm程度）にした．

Table 1. Characteristics of materials.

Powder	Moisture content (% w.b.)	True density (kg・m^{-3})	Bulk density (kg・m^{-3})	void (%)
Soft flour	13.21	1513	457.5	69.76
Middle flour	12.84	1537	503.2	67.26
Hard flour	13.53	1478	555.3	62.43
Rye flour	13.11	1559	460.1	70.49
Rice flour	13.46	1530	610.4	60.10
Soyameal flour	7.73	1428	523.3	63.35
Corn starch	12.58	1536	499.3	67.50



① Vacuum oup ② Vacuum space ③ Powder
④ Measuring point of powder
⑤ Thermo-couples 5) Copper
⑥ Measuring point of heat source
⑦ Heater ⑧ ABS resin ⑨ Recorder
⑩ Recorder ⑪ ZERO-CON ⑫ Power supply

Fig.1. Schematic diagram of measurement appratus.

熱源温度測定用の熱電対には0.1mmのものを用い，銅の側面に穴をあけ，直接埋め込んで温度を測定した．銅ブロックの中心と側方での温度差はなかった．

以下測定手順を示す．まず容器に熱源，熱電対を装置し，試料を充塡する．熱源の銅ブロックは腐食し易いので，測定を開始する前には0.1Nの塩酸で，表面を磨き，常に表面がクリーンな状態にしておく．熱源と試料の温度が一致したらヒーターのスイッチをONにする．ヒーターにかける電圧は20Vで，あらかじめスライダックで調整しておく，熱源の温度が50°Cに達したら，スイッチをOFFにする．60分程で熱源と試料の温度は一致し平衡に達する．この間の温度変化はペンレコーダに記録しておく．この測定値から次に示す計算方法にしたがって，熱特性を算出した．

3．基礎式

測定装置の項で述べたように，粉体中の熱移動は一方向と仮定される．したがって次の一次元非定常熱伝導方程式が成立する．

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\kappa\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) \tag{1}$$

測定は熱源も粉体も一様な温度分布の状態で始められるので初期条件は次式で与えられる．

初期条件

$$T=T_S=T_0,\quad t=0,\quad 0\leqq x \tag{2}$$

粉体の熱源と接する部分は熱源の温度と等しいので境界条件の第一は次式で与えられる．

境界条件

$$T_S=(T)_{x=0} \tag{3}$$

熱源のエンタルピの増加量は発熱量Qと粉体との接触面で流出する熱量の差に等しいことから境界条件の第二は次式で与えられる．

境界条件 2

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=0}=\frac{C_{ps}M}{\lambda S}\quad\frac{dT_s}{dt}-\frac{Q}{\lambda S} \tag{4}$$

ただし，

$$Q=Q_0,\quad 0<t<t_c \tag{5}$$

（1），（3），（4）式をそれぞれラプラス変換して，

$$\frac{d^2F}{dx} - q^2F + \frac{T_0}{\kappa} = 0 \tag{6}$$

$$F = F_s,\ x = 0 \tag{7}$$

$$\left(\frac{dF}{dx}\right)_{x=0} = \frac{C_{ps}M}{\lambda S}(pF_s - T_0) - \frac{Q_0}{\lambda S \cdot p}(1-\exp(t_c p)) \tag{8}$$

を得る．
式(6)は2階の常微分方程式であるが，その一般解は

$$F = Ae^{-qx} + Be^{qx} + \frac{T_0}{p} \tag{9}$$

となるが，モデルは半無限体であるため，B=0でなくてはならない．したがって

$$F = Ae^{-qx} + \frac{T_0}{p} \tag{10}$$

となる．式(7)と式(10)より

$$F_s = F_{x=0} = A + \frac{T_0}{p} \tag{11}$$

であるから

$$A = F_s - \frac{T_0}{p} \tag{12}$$

となる．
また，

$$a = \frac{\lambda S}{\kappa_{ps}(C_{ps}M)} \tag{13}$$

とすると，境界条件2の$\left(\frac{dF}{dx}\right)_{x=0}$

は式(10)より-A・qなので，式(8)，(12)より

$$\frac{1}{\kappa a}(pF_s - T_0) - \frac{Q_0}{\lambda S \cdot p}(1-\exp(-t_c p))$$

$$= -\left(F_s - \frac{T_0}{p}\right) q \tag{14}$$

となる．これをF_sについて解くと

$$F_s = \frac{1}{q(q+a)} \cdot \frac{T_0}{\kappa} + \frac{a}{q(q+a)} \cdot T_0$$

$$+ \frac{Q_0}{\lambda S} \cdot \frac{1}{pq(q+a)}(1-\exp(t_c p)) \tag{15}$$

となり，さらにこれを逆変換すると，熱源温度T_sは

$$T_s = T_0 + \frac{Q_0}{\lambda S \cdot a} \cdot (2\sqrt{\kappa a^2 t/\pi} - 1$$

$$+ e^{\kappa a^2 t}\,\mathrm{erfc}(\sqrt{\kappa a^2 t}))$$

$$- \frac{Q_0}{\lambda S \cdot a} \cdot (2\sqrt{\kappa a^2 (t-t_c)/\pi} - 1$$

$$+ e^{\kappa a^2 (t-t_c)}\,\mathrm{erfc}(\sqrt{\kappa a^2 (t-t_c)})) \tag{16}$$

となる．ただし，

$$\frac{Q_0}{\lambda S \cdot a} = \zeta \tag{17}$$

$$\zeta = \frac{T_c - T_0}{2\sqrt{\kappa a^2 t_c/\pi} - 1 + \exp(\kappa a^2 t_c)} \cdot \frac{1}{\mathrm{erfc}(\sqrt{\kappa a^2 t_c})} \tag{18}$$

でなければならない．
また，Fは式(10)，(12)より

$$F = F_s e^{-qx} - \frac{T_0}{p} e^{-qx} + \frac{T_0}{p} \tag{19}$$

なので，これを逆変換すると，粉体温度Tは

$$T = T_0 + \zeta\{2\sqrt{\kappa a^2 t/\pi} \cdot e^{-x^2/4\kappa t}$$

$$-(1+ax) \cdot \mathrm{erfc}(x/(2\sqrt{\kappa t}))$$

$$+ e^{ax+\kappa a^2 t} \cdot \mathrm{erfc}(x/2\sqrt{\kappa t} + \sqrt{\kappa a^2 t})\}$$

$$+ \zeta\{2\sqrt{\kappa a^2 (t-t_c)/\pi} \cdot e^{-x^2/4\kappa(t-t_c)}$$

$$-(1+ax) \cdot \mathrm{erfc}(x/(2\sqrt{\kappa(t-t_c)}))$$

$$+e^{ax+\kappa a^2(t-t_c)}\cdot \mathrm{erfc}(x/2\sqrt{\kappa(t-t_c)}$$

$$+\sqrt{\kappa a^2(t-t_c)})\} \tag{20}$$

となる。

4．熱特性値の計算法

熱特性値計算の手順を Fig.2 に示す．まずディスプレイ上に経過時間毎の熱源の温度測定結果（T_s）をプロットし，次に式(16)において，κa^2の値を入力し，経過時間毎の熱源の温度を計算により求め，これを曲線化する．計算値と実測値の曲線とが一致すれば κa^2の値を決定する．一致しなければ，κa^2の値を入力し直し，再び計算を行う。κa^2の値が決定すれば，式(20)において同様に，粉体の温度測定値(T)に対して a の値のあてはめを行う．κa^2および a の値から直ちに温度伝導率 κ が計算される．また，次式によって熱伝導率 λ が計算される．

$$\lambda=\frac{\kappa(C_{ps}M)a}{S} \tag{21}$$

さらに，粉体の充塡密度 ρ を求めておくことにより，温度伝導率，熱伝導率から次式によって比熱 C_pが計算される．

$$C_p=\frac{\lambda}{\rho\kappa} \tag{22}$$

結果及び考察

1．基準物質の測定値

試作した装置により正確に穀物粉体の熱物性値が測定できるかどうかを調べるためにまず α-アルミナの熱物性値を測定した．α-アルミナは諸々の測定において基準物質としてよく用いられる白色粉末である．一般的には，比重が 3.90，比熱が 0.96kJ・kg^{-1}・K^{-1} (100°C) である（青木，1975）．

Fig. 3 に α-アルミナの温度変化解析図を，Table 3 に熱特性の測定値を示す．比熱についてみると，0.943kJ・kg^{-1}・K^{-1}と，一般に知られている値にきわめて近い値がでており，この測定方法により粉体の熱特性値が求められることがわかった．

2．各粉体の熱特性

Table 4 に各粉体の熱特性測定値を，Fig.4 に例として薄力粉の温度変化解析図を示す．各粉体で多少の差はあるものの，κa^2は 0.0001 前後，a は 20～50 の値で，測定値と一致し，温度上昇に要した熱量は 3500～4000J であった．尚，測定はそれぞれの粉体について 5 回以上行った．

温度伝導率の測定値は，薄力粉が $1.894\times10^{-4}m^2\cdot h^{-1}$，中力粉が $1.785\times10^{-4}m^2\cdot h^{-1}$，強力粉が $1.895\times10^{-4}m^2\cdot h^{-1}$，ライ麦粉が $2.187\times10^{-4}m^2\cdot h^{-1}$，米粉が $2.269\times10^{-4}m^2\cdot h^{-1}$，脱脂大豆粉が $2.244\times10^{-4}m^2\cdot h^{-1}$，コーンスターチが $2.192\times10^{-4}m^2\cdot h^{-1}$であった．

熱伝導率についてみると，薄力粉は 0.0409W・m^{-1}・K^{-1}，中力粉は 0.0461W・m^{-1}・K^{-1}，強力粉は 0.0383W・m^{-1}・K^{-1}，ライ麦粉は 0.0450W・m^{-1}・K^{-1}，米粉が 0.0539W・m^{-1}・K^{-1}，脱脂大豆粉が0.0408W・m^{-1}・K^{-1}，コーンスターチが 0.0348W・m^{-1}・K^{-1}という結果を得た．小麦粉の値をみると小麦粒子層の有効熱伝導率の値（村田・松岡，1979　山口，1979）をかなり下回った値となっているし，他の粉体もすべて 0.1 を下回っている．しかし比熱については，薄力粉が 1.497kJ・kg^{-1}・K^{-1}，中力粉 1.524kJ・kg^{-1}・K^{-1}，強力粉 1.237kJ・kg^{-1}・K^{-1}，ライ麦粉1.484kJ・kg^{-1}・K^{-1}，米粉 1.433kJ・kg^{-1}・K^{-1}，脱脂大豆粉 1.180kJ・kg^{-1}・K^{-1}コーンスターチ 1.096kJ・kg^{-1}・K^{-1}と近い値（加藤，1979 村田ら，1987）がでている．これは比熱が大きさ，形状に関係のない物性値であり，混入する大気の熱容量が無視できることから当然のことであるが，一方この測定の精度を保証する結果となっている．

今回は水分一定（13%w.b.）のもとで測定を行ったが，熱源によるばらつきや，個々の測定によるばらつきが生じた．しかしその値は小さく，測定精度の範囲に入るものと考えられる．

今後，粉体に適した熱特性の測定方法および測定精度の検討を行い，さらに，水分，かさ密度，温度等の幅広い条件下における測定データの蓄積により，それらの因子の熱特性への依存性を明らかにしていく予定である．

記　　号

a　：式(13)で定義
C_p：試料比熱　[kJ・kg^{-1}・K^{-1}]
C_{ps}：熱源比熱　[kJ・kg^{-1}・K^{-1}]
F　：温度 T のラプラス変換
F_s：温度 T_sのラプラス変換
p　：ラプラス変換の裏変数
q　：$\sqrt{p/\kappa}$
S　：熱源と試料の接触面の面積　[m^2]
T　：試料の温度　[°C,K]
T_s：熱源の温度　[°C,K]

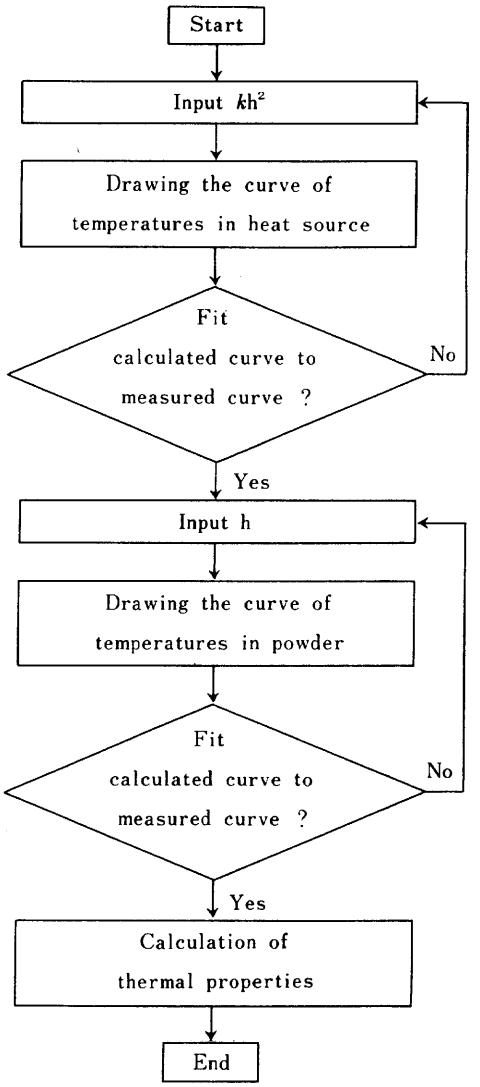


Fig.2. Procedure for calculation of themal properties.

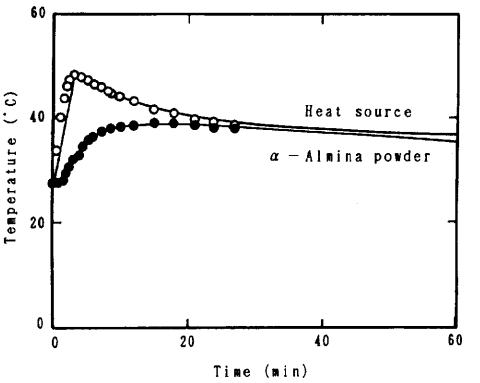


Fig.3. Temperatures response of α-Alumina powder and heat source.
○ : Measured temperatures of heat source
● : Measured temperatures of α-Alumina powder

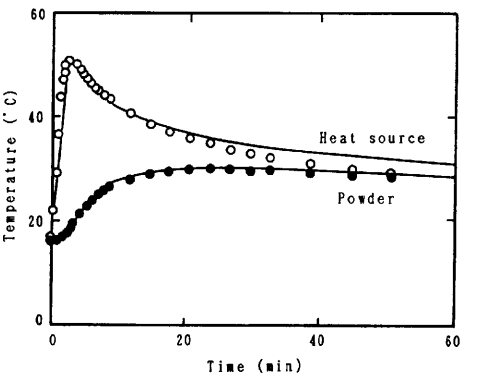


Fig.4. Temperatures response of powder and heat source(Ex. Wheat flour).
○ : Measured temperatures of heat source
● : Measured temperatures of powder

Table 2. Speciffications of heat source.

Weight of copper	132.38%
Heater wire	Manganin wire (ϕ0.3mm)
Heat capacity	48.98 J・K^{-1}
Difference of temp.	36.45 K
Heating time	60s
Calorific value	3999.6 J

Table 3. Measured thermal properties of α-Almina powder.

Thermal diffusivity $\varkappa$($\times 10^{-4}$m^2・h^{-1})	5.1593
Thermal conductivity λ(W・m^{-1}・K^{-1})	0.1194
Specific heat C_p(kJ・kg^{-1}・K^{-1})	0.9246

Table 4. Measured thermal properties of powders.

Powder	Thermal diffusivity κ ($\times 10^{-4} m^2 \cdot h^{-1}$)	Thermal conductivity λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Specific heat C_p ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
Soft flour	1.894	0.0409	1.497
Middle flour	1.785	0.0461	1.524
Hard flour	1.895	0.0383	1.237
Rye flour	2.187	0.0450	1.484
Rice flour	2.269	0.0539	1.433
Soyameal flour	2.244	0.0408	1.180
Corn starch	2.192	0.0348	1.096

T_0：熱源および試料の初期温度 [°C,K]
t ：時間 [h]
t_c：試料が最高温度に達した時間 [h]
x ：試料中にとった熱源からの距離 [m]
M ：熱源の質量 [kg]

ギリシャ文字
ξ ：式 (17) で定義
κ ：試料の温度伝導率 [$m^2 \cdot s^{-1}$]
λ ：試料の熱伝導率 [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
ρ ：試料のかさ密度 [$kg \cdot m^{-3}$]

要　　約

穀物粉体の3つの基礎的な熱特性を同時に測定するために，日用品の真空断熱カップの底に熱容量が既知である円筒状の銅ブロックを装着した新しい半無限体温度上昇モデルを開発した．

このカップに粉を満たし，ヒータのスイッチを入れ，ブロックとブロック表面から5mmの粉の温度変化を測定し，これに，パラメータを仮定して計算した種々の曲線を適合させることによって，熱特性を決定した．

水分13%w.b.における小麦粉3種(薄力粉，中力粉，強力粉)，ライ麦粉，米粉，脱脂大豆粉，コーンスターチの熱特性値は，温度伝導率が，
1.894×10^{-4}, 1.785×10^{-4}, 1.895×10^{-4}, 2.187×10^{-4}, 2.269×10^{-4}, 2.244×10^{-4}, 2.172×10^{-4} ($m^2 \cdot h^{-1}$),
熱伝導率が，
0.0409, 0.0461, 0.0383, 0.0450, 0.0539, 0.0408, 0.0348 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$),
比熱が，
1.497, 1.524, 1.237, 1.484, 1.433, 1.180, 1.096 ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
であった．

この方法の精度を保証するために α-アルミナの比熱を測定したところ，その値はDSCの比熱測定の標準値（村田ら，1987）と一致した．

文　　献

青木隆一　1975　井伊谷鋼一編：粉体物性図説．産業技術センター，東京，129頁，218頁

加藤宏郎　1979　穀物の水分と熱に関する基礎的特性—比熱，平衡含水率，湿潤熱—．農産物性研究(第1集)，102-122

村田　敏・松岡孝尚　1979　穀物の熱伝導率とその測定法．農産物性研究（第1集），140-153

村田　敏・田川彰男・石橋貞人　1987　DSCによる穀物の比熱測定．農業機械学会誌，**46**(6): 547-554

坂下　攝　1988　粉体プラント設計，工業調査会，東京

山口信吉　1979　穀類に関する伝熱速度，物質移動速度及び力学的挙動の特性．農産物性研究(第1集)，123-139

Summary

A new model for the temperature rise of an infinite medium with a heat source of a cylindrical copper block of known specific heat in a vacuum adiabatic cup of daily use is

developed for simultaneous determination of three basic thermal properties of the cereal grain powders.

After the cup was filed with the powder and the heater was switched on, the transient temperature of the block and the powder at 5mm from the block surface was measured, and the thermal properties were determined by fitting theoretically calculated curves with assumed parameters to the measured curve.

Thermal properties of three kinds of wheat flour(soft, midle and hard), rye flour, rice flour, soyameal flour and corn starch at 13% w.b. were, respectively, 1.894×10^{-4},1.785×10^{-4},1.895×10^{-4},2.187×10^{-4},2.269×10^{-4},2.244×10^{-4},2.192×10^{-4}($m^2 \cdot h^{-1}$)on thermal diffusivity, 0.0409, 0.0461, 0.0383, 0.0450, 0.0539,0.0408,0.0348($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)on thermal conductivity, and 1.497, 1.524, 1.237, 1.484, 1.433, 1.180, 1.096($kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)on specific heat.

The specific heat of α-Alumina powder were measured also to assure the accuracy of the method, and the value was agreed well with the standard value of the specific heat for DSC measurement.