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

言

緒

パン,麵類,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, ϕ 60mm)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10³~10⁴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(ϕ 0.3mm 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。

- 93 -

	Moisture content	True density	Bulk density	void
Powder	(% w.b.)	(kg • m ⁻³)	(kg • m ⁻³)	(%)
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
Rve flour	13.11	1559	460.1	70.49
Rice flour	13.46	1530	610.4	60.10
Sovameal flour	7.73	1428	523.3	63.35
Corn starch	12.58	1536	499.3	67.50

Table 1. Characteristics of materials.



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,試料を充填する。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℃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

$$T = T_s = T_o, \quad t = 0, \quad 0 \le x$$
 (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

$$T_{s} = (T)_{x=0}$$
(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

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=0} = \frac{C_{\rho s}M}{\lambda S} \qquad \frac{dT_s}{dt} - \frac{Q}{\lambda S}$$
(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,

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

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

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

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

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

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

となる. 式(7)と式(10)より

$$F_{s} = F_{x=0} = A + \frac{T_{0}}{p}$$
(11)

であるから

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

となる。

また,

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

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

 $F_{s} = \frac{1}{q(q+a)} \cdot \frac{T_{0}}{\kappa} + \frac{a}{q(q+a)} \cdot T_{0}$ $+ \frac{Q_{0}}{\lambda S} \cdot \frac{1}{pq(q+a)} (1 - \exp(t_{c}p)) \qquad (15)$ $\geq t x b, \quad z \in \mathbb{Z} \ h c \neq \forall z \notin p \neq z \geq , \quad \text{熱療温度} \ T_{s} dz$ $T_{s} = T_{0} + \frac{Q_{0}}{\lambda S \cdot a} \cdot (2\sqrt{\kappa a^{2} t/\pi} - 1)$ $+ e^{\kappa a^{2} t} \operatorname{erfc} (\sqrt{\kappa a^{2} t}))$ $- \frac{Q_{0}}{\lambda S \cdot a} \cdot (2\sqrt{\kappa a^{2} (t-t_{c})/\pi} - 1)$ $+ e^{\kappa a^{2} (t-t_{c})} \operatorname{erfc} (\sqrt{\kappa a^{2} (t-t_{c})})) \qquad (16)$ $\geq t z \leq , \quad t \geq \mathbb{Z} \cup ,$ $\frac{Q_{0}}{\lambda S \cdot a} = \zeta \qquad (17)$

$$\zeta = \frac{T_c - T_{\theta}}{2\sqrt{\kappa a^2 t_c / \pi} - 1 + \exp\left(\kappa a^2 t_c\right)} \cdot \frac{1}{\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\kappa a^2 t_c}\right)} \quad (18)$$

でなければならない。 また,F は式(10),(12)より

(14)

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

なので、これを逆変換すると、粉体温度 T は

$$T = T_0 + \zeta \{ 2\sqrt{\kappa a^2 t/\pi} \cdot e^{-x^2/4\kappa t} - (1+ax) \cdot \operatorname{erfc}(x/(2\sqrt{\kappa t})) + e^{ax+\kappa a^2 t} \cdot \operatorname{erfc}(x/2\sqrt{\kappa t} + \sqrt{\kappa a^2 t}) \} + \zeta \{ 2\sqrt{\kappa a^2 (t-t_c)/\pi} \cdot e^{-x^2/4\kappa (t-t_c)} - (1+ax) \cdot \operatorname{erfc}(x/(2\sqrt{\kappa (t-t_c)})) \}$$

となる.これを F_s について解くと

(20)

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

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

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, xa^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 xa^2 の 値を決定する.一致しなければ, xa^2 の値を入力し直 し,再び計算を行う。 xa^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. xa^2 および a の値から直ちに温度 伝導率 x 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.

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

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。

$$C_{\rho} = \frac{\lambda}{\rho_{\kappa}}$$
 (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, xa²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 1.894×10⁻⁴m²・ h⁻¹,中力粉が 1.785×10⁻⁴m²・h⁻¹,強力粉が 1.895× 10⁻⁴m²・h⁻¹,ライ麦粉が 2.187×10⁻⁴m²・h⁻¹,米粉が 2.269×10⁻⁴m²・h⁻¹,脱脂大豆粉が 2.244×10⁻⁴m²・h⁻¹, コーンスターチが 2.192×10⁻⁴m²・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

•
$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
[m²]
[°C,K]
[°C,K]



Fig.2. Procedure for calculation of themal properties.

Table	2.	Speciffications	of	heat	source.
-------	----	-----------------	----	------	---------

Weight of copper Heater wire	132.38% Manganin wire (d0 3mm)
Heat capacity	48.98 J • K ⁻¹
Difference of temp.	36.45 K
Heating time	60s
Calorific value	3999.6 J



Fig.3. Temperatures response of α -Alumina powder and heat source.

 \bigcirc : Measured temperatures of heat source \bigcirc : Measured temperatures of α -Alumina powder



Fig.4. Temperatures response of powder and heat source(Ex. Wheat flour).

- \bigcirc : Measured temperatures of heat source
- ${\ensuremath{\bullet}}$: Measured temperatures of powder

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

Thermal diffusivity $r(\times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1})$	5.1593	
Thermal conductivity $\lambda(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	0.1194	
Specific heat $C_{p}(kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	0.9246	

Powder	Thermal diffusivity κ $(\times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1})$	Thermal conductivity λ (W • m ⁻¹ • 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
Rve flour	2.187	0.0450	1.484
Rice flour	2.269	0.0539	1.433
Sovameal flour	2.244	0.0408	1.180
Corn starch	2.192	0.0348	1.096

Ta	ble	4.	Μ	leasured	thermal	properties	of	powders
	~~~					<b>P</b> * <b>O P O * *</b> • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	-	

T₀: 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

ζ	:式(17)で定義	
x	: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 • m ⁻³ ]

約

要

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、 プロックとプロック表面から 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,

 $1.894 \times 10^{-4}$ ,  $1.785 \times 10^{-4}$ ,  $1.895 \times 10^{-4}$ ,  $2.187 \times 10^{-4}$ ,

 $2.269 \times 10^{-4}$ ,  $2.244 \times 10^{-4}$ ,  $2.172 \times 10^{-4}$ (m² • h⁻¹),

熱伝導率が,

0.0409,0.0461,0.0383,0.0450,0.0539,0.0408,0.0348(W ·

m⁻¹ • K⁻¹),

比熱が,

1.497,1.524,1.237,1.484,1.433,1.180,1.096(kJ⋅kg⁻¹⋅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。

#### 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

文

- 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,

 $1.894 \times 10^{-4}, 1.785 \times 10^{-4}, 1.895 \times 10^{-4}, 2.187 \times 10^{-4}, 2.269 \times 10^{-4}, 2.244 \times 10^{-4}, 2.192 \times 10^{-4} (m^2 \cdot h^{-1}) on thermal diffusivity, 0.0409, 0.0461, 0.0383, 0.0450, 0.0539, 0.0408, 0.0348 (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}) on thermal conductivity, and 1.497, 1.524, 1.237, 1.484, 1.433, 1.180, 1.096 (kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}) on specific heat.$ 

The specific heat of  $\alpha$ -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.