非定常プローブ法による小麦粉の熱物性の測定

村松良樹*・田川彰男**・笠井孝正***・境 博成***・福島正義***

Measurements of Thermophysical Properties of Wheat Flour by
Transient Heat Flow Method Using a ProbeYoshiki MURAMATSU*, Akio TAGAWA**, Takamasa KASAI***,
Hiroshige SAKAI*** and Masayoshi FUKUSHIMA**** *The Graduate School of Bio-industry, Tokyo University of Agriculture,
196, Yasaka, Abashiri-shi, Hokkaido 099-2493 : Research Fellow of the
Japan Society for the Promotion of Science*** *The Graduate School of Science and Technology, Chiba University,
1-33, Yayoi-chou, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8522**** *Faculty of Bioindustry, Tokyo University of Agriculture,
196, Yasaka, Abashiri-shi, Hokkaido 099-2493*

Thermophysical properties of wheat flour were measured by the transient heat flow method using a probe at various moisture contents, temperatures and bulk densities. Using the relation of probe temperature versus elapsed time, four parameters were determined by applying a least-square method to an approximate solution of the equation for heat conduction corrected for probe finite diameter. The measured transient probe temperature for wheat flour agreed well with the calculated temperature. Based on the obtained values of four parameters, effective thermal conductivity and effective thermal diffusivity of wheat flour were determined. In addition, using these values and bulk density, the specific heat of wheat flour was estimated. The effects of moisture content, temperature and bulk density on these thermophysical properties were discussed.

(Received May 10, 1999 ; Accepted Jul. 26, 1999)

食品の流通・貯蔵・加工・調理などのプロセスには、加熱や冷却を伴う様々な熱操作が含まれる。これらの操作を行う装置・設備の設計やその合理的操作法を検討するためには、対象とする食品の熱物性値を把握することが必要となる。穀物の熱物性は、多く測定、研究されており、水分や温度の関数として表されている¹⁾。これに比べ、粉体食品に関する熱物性値のデータやそれらの熱物性値と水分、温度との関係を調べた例は少ない。本研究では、このような現状を踏まえ、測定例が少なく、また食品素材として用途が広い小麦粉を用い、バルク状態における熱物性値を測定した。

さて、バルク状態で測定された熱物性値、たとえば有効熱伝導率や有効温度伝導率は、充填状態（かさ密度や空隙率）によって異なることが予測される。そのため、幅広い同一充填条件下での熱物性値の測定データは、より実用的になると考えられる。しかし、このような状態での測定例は少なく、また、熱物性値に及ぼすかさ密度の影響を調べた例は、松岡²⁾、DROUZAS と SARAVACOS³⁾により報告されている程度である。

本研究では、非定常プローブ法により小麦粉の熱物性を数段階の水分、温度、かさ密度において測定した。ここでは、田川と村田⁴⁾の方法と同様に、BLACKWELL⁵⁾に

* 東京農業大学大学院生物産業学研究所 (〒099-2493 北海道網走市八坂 196) : 日本学術振興会特別研究員

** 千葉大学大学院自然科学研究科 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33)

*** 東京農業大学生物産業学部 (〒099-2493 北海道網走市八坂 196)

よる熱伝導方程式の近似解析解を利用して、同一充填下における小麦粉の有効熱伝導率（以下、熱伝導率）と有効温度伝導率（以下、温度伝導率）を同時に算出した。また、これらの値と測定時のかさ密度の値から試料比熱も推算し、さらに、熱物性値と試料水分、温度、かさ密度との関係を調べ、それらの結果をまとめたので報告する。

実験方法

1. 試料と水分調整

供試した小麦粉は北海道産チホク小麦100%の中力粉（日清製粉（株）製、つらら）で、その初期水分は12%（w.b.）であった。測定の際には、10、12、15、18%（w.b.）の4段階の水分になるように乾燥あるいは吸湿させることによって調整したものをを用いた。

15、18%（w.b.）の水分は、薄く広げた試料に霧吹きで所要の蒸留水を噴霧して調整した。10%（w.b.）については、35℃で30分間乾燥させることによって得た。このようにして水分調整した試料をビニール袋に入れて密封し、室温にて2～3日放置した後、供試した。

なお、試料の水分は2 g-135℃-1時間烘乾法⁵⁾により測定した。

2. 測定装置

本研究で用いた測定装置の概略をFig. 1に示す。この

Fig. 1 Schematic diagram of an experimental apparatus

装置は文献⁴⁾と同様であるが、本研究では先端を閉じた外径1 mm、長さ100 mmの銅製パイプの中に加熱線、T型熱電対およびシリコンオイルを入れたプローブに変更した。また、試料容器には直径30 mm、高さ200 mmの銅製円筒容器を用いた。

3. プローブによる熱物性の測定方法

試料の熱物性を非定常プローブ法により測定した。測定は4段階の各水分に対し、10、20、30、40、50℃の5段階の温度および428、500、600、700 kg/m³の4段階のかさ密度についてそれぞれ行った。

前述の円筒容器に試料を充填したところ、かさ密度は428 kg/m³（±5%）であったため、この結果を基に、圧縮試験器（ORIENTEC, RTC-1310 A）を利用して500～700 kg/m³になるよう測定時の試料かさ密度を調整した。

また、プローブと試料が熱的平衡に達したと見なせたときプローブに電流を流し、このときのプローブ内熱電対の示す温度変化を記録した。なお、本研究では、プローブにかかる電圧、回路に流れる電流をそれぞれ0.546 V、60 mAとし、また、測定時間（プローブに電流を供給する時間）は180秒とした。

実験結果及び考察

1. 熱源（プローブ）温度の経時変化

非定常プローブ法による熱物性の測定において、熱源の太さを考慮し、熱源と試料との間に接触熱抵抗のみを考える場合には、熱伝導方程式の近似解である次のBLACKWELL式⁵⁾を用いる。

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{q}{4\pi\lambda_2} \left[\ln 4 T' - \gamma + \frac{2\lambda_2}{bH} + \frac{1}{2T'} \left\{ \ln 4 T' - \gamma + 1 - \frac{M_1 c_1 \kappa_2}{\pi b^2 \lambda_2} \left(\ln 4 T' - \gamma + \frac{2\lambda_2}{bH} \right) \right\} + o\left(\frac{1}{T'^2}\right) \right] \quad (1)$$

ここで $T' = (\kappa_2 t)/b^2$ である。この式(1)は $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0$ とすると、

$$\Delta\theta = A \cdot \ln t + B + \frac{1}{t} (C \cdot \ln t + D) \quad (2)$$

の形式にまとめることができる。

ここで、

$$A = \frac{q}{4\pi\lambda_2} \quad (3)$$

$$B = \frac{q}{4\pi\lambda_2} \left(\ln \kappa_2 - 2 \ln b + \ln 4 - \gamma + \frac{2\lambda_2}{bH} \right) \quad (4)$$

$$C = \frac{q}{4\pi\lambda_2} \left(\frac{b^2}{2\kappa_2} - \frac{M_1 c_1}{2\pi\lambda_2} \right) \quad (5)$$

$$D = \frac{q}{4\pi\lambda_2} \left\{ \frac{b^2}{2\kappa_2} (\ln\kappa_2 - 2\ln b + \ln 4 - \gamma + 1) - \frac{M_1 c_1}{2\pi\lambda_2} \left(\ln\kappa_2 - 2\ln b + \ln 4 - \gamma + \frac{2\lambda_2}{bH} \right) \right\} \quad (6)$$

である。田川と村田⁴⁾は、式(2)のパラメータA～Dの値を利用して豆の熱物性値を推算している。

本研究においても同様に、まず測定データであるプローブ温度の経時変化を各測定条件ごとに式(2)に最小二乗法を適用してあてはめ、測定値と式(2)との適合性を調べた。その一例として、水分12% (w.b.)、温度30℃、かさ密度428 kg/m³におけるプローブ温度の経時変化をFig. 2に示す。図中の●は測定値、実線は式(2)による計算値で、測定値と計算値は良く一致している。このとき、式(2)のパラメータの値はA=0.468, B=-7.36×10⁻⁴, C=-0.545, D=0.460, また、標準偏差の値は0.006℃となった。他の測定条件下においても同様に、測定値と式(2)による計算値は良く一致した。

このように、プローブ法による熱源の温度変化と時間の関係は式(2)で精度良く表される。これより、本研究においても式(2)を利用して小麦粉の熱物性値を推算することにし、以下、式(2)を利用して得られた熱物性値と水

分、温度、かさ密度との関係について考察する。

2. 熱伝導率

プローブの単位時間、単位長さあたりの発熱量 q が既知であるため、熱伝導率はパラメータAの値、すなわち式(3)から求めることができる。Fig. 2の条件の場合、 $q = 0.546 \times 0.06 \times 10 = 0.328$ W/m, A=0.468であるから、これらの値を式(3)に代入すると熱伝導率 λ_2 の値は0.056 W/(m·K)となる。また、このとき、非定常双子型プローブ法⁷⁾(プローブ法を用いた比較測定法で、精度良く熱伝導率を測定することができるとされている方法)による測定値は0.058 W/(m·K)で、式(3)から得られた値とほぼ一致した。その他の測定条件下においても、本研究で得られた値と非定常双子型プローブ法による値を比較したところ、その偏差は0.005 W/(m·K)程度となり、両者はほぼ一致した。

さて、穀物の熱伝導率は水分や温度の関数として表されており¹⁾、村田と松岡⁸⁾は穀物や豆などの熱伝導率は水分の一次式で表される、としている。また、玄米の熱伝導率を水分に関して二次式、温度に関して一次式として表している例もある¹⁾。ここでも同様に小麦粉の熱伝導率と水分、温度との関係を検討する。かさ密度500 kg/m³での小麦粉の熱伝導率と水分との関係をFig. 3に示す。図から各温度において、熱伝導率は水分が高くなるにつれて増加する傾向があり、この間に二次の関係があることが伺える。また、熱伝導率を温度に対してブ

Fig. 2 Comparison of the measured result with the calculation by equation (2) of wheat flour (moisture content : 12% (w.b.), temperature : 30℃, bulk density : 428 kg/m³)

●, measured ;

—, calculated from equation (2)

Fig. 3 Relationships between effective thermal conductivity and moisture content at five different temperatures of wheat flour (bulk density : 500 kg/m³)

—, calculated from equation (7)

ロットした結果、熱伝導率は温度の一次式で表されることが推察された。これらのことから、熱伝導率を水分に関して二次式、また温度について一次式とした次の実験式¹⁾ (7) に、最小二乗法を適用して各かさ密度ごとに測定データをあてはめた。

$$\lambda_2 = a_1 M^2 \cdot T + b_1 M \cdot T + d_1 T + e_1 M^2 + f_1 M + g_1 \quad (7)$$

Fig. 3 中の実線は式 (7) による計算値で、測定値と計算値はほぼ一致している。このとき式 (7) のパラメータの値は $a_1 = 9.14 \times 10^{-6}$, $b_1 = -1.71 \times 10^{-4}$, $d_1 = 1.12 \times 10^{-3}$, $e_1 = -1.31 \times 10^{-4}$, $f_1 = 3.85 \times 10^{-3}$, $g_1 = 2.85 \times 10^{-2}$, 標準偏差の値は $1.79 \times 10^{-3} \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ となった。他のかさ密度の場合についても測定データと式 (7) による計算値はほぼ一致し、小麦粉の熱伝導率と水分、温度との関係は式 (7) で表されることが分かった。

さて、熱伝導率は充填層中の空気量が減少する、すなわちかさ密度が増すと増加することが予測される。熱伝導率をかさ密度の一次式²⁾³⁾、またかさ密度と表裏の関係にある空隙率の二次式¹⁾ で表した例がある。水分 10% (w.b.) での小麦粉の熱伝導率とかさ密度の関係を各温度に対して求めると、Fig. 4 に示すような結果が得られた。図から分かるように、かさ密度の増加に伴って熱伝導率は直線的に増加している。図中の実線は次式による計算値で、水分 10% (w.b.) のときの各温度における式

Fig. 4 Relationships between effective thermal conductivity and bulk density at five different temperatures of wheat flour (moisture content : 10% (w.b.))

——, calculated from equation (8)

(8) のパラメータおよび標準偏差の値を Table 1 に示す。

$$\lambda_2 = a_2 \rho + b_2 \quad (8)$$

このように水分 10% (w.b.) の場合、小麦粉の熱伝導率とかさ密度の関係は式 (8) で表されることが分かった。他の水分の各温度についても、小麦粉の熱伝導率は式 (8) のようにかさ密度の一次式で整理することができた。

3. 温度伝導率

式 (3)~(6) における H および $M_1 c_1$ の値が未知の場合、温度伝導率は、式 (3)~(5) を式 (6) に代入して得られる次の非線形の方程式を解くことによって求められる。

$$X(\ln X - E) + F = 0 \quad (9)$$

ここで、

$$X = \frac{1}{\kappa_2}$$

$$E = -2 \ln b + \ln 4 - \gamma + 1 - \frac{B}{A}$$

$$F = \frac{2}{b^2} \left(\frac{D}{A} - \frac{BC}{A^2} \right)$$

であり、 E, F の値は既知である。この式 (9) を解くことによって得られた X の逆数が試料の温度伝導率となる。本研究では式 (9) を Newton 法⁹⁾ により解いた。

このようにして算出したかさ密度 500 kg/m^3 における小麦粉の温度伝導率と水分との関係を Fig. 5 に示す。図から、各温度において、温度伝導率は、水分が高くなると大きくなる傾向があり、水分の二次式で表されることが伺える。また、温度伝導率を温度に対してプロットしたところ、この間に一次の関係があることが推察された。これより熱伝導率の場合と同様に、小麦粉の温度伝導率の値を次式にあてはめた。

$$\kappa_2 = a_3 M^2 \cdot T + b_3 M \cdot T + d_3 T + e_3 M^2 + f_3 M + g_3 \quad (10)$$

Fig. 5 中の実線は式 (10) による計算値で、測定値と計

Table 1 Values of parameters and standard deviations of the equation (8) for wheat flour (moisture content : 10% (w.b.))

Temperature (°C)	a_2	b_2	S.D.*
10	1.48×10^{-4}	-1.58×10^{-2}	1.13×10^{-3}
20	1.57×10^{-4}	-1.72×10^{-2}	2.07×10^{-4}
30	1.58×10^{-4}	-1.48×10^{-2}	6.26×10^{-4}
40	1.66×10^{-4}	-1.50×10^{-2}	4.06×10^{-4}
50	1.71×10^{-4}	-1.39×10^{-2}	1.41×10^{-3}

* S.D. : standard deviation

Fig. 5 Relationships between effective thermal diffusivity and moisture content at five different temperatures of wheat flour (bulk density : 500 kg/m³)

——, calculated from equation (10)

Fig. 6 Relationships between effective thermal diffusivity and bulk density at five different temperatures of wheat flour (moisture content : 10% (w.b.))

——, calculated from equation (11)

算値はほぼ一致している。このとき式(10)のパラメータの値は $a_3=6.01 \times 10^{-12}$, $b_3=-9.09 \times 10^{-11}$, $d_3=5.27 \times 10^{-10}$, $e_3=-6.21 \times 10^{-11}$, $f_3=1.09 \times 10^{-9}$, $g_3=5.92 \times 10^{-8}$, 標準偏差の値は $1.82 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ となった。他のかさ密度についても、小麦粉の温度伝導率と温度、水分との関係は式(10)で近似できた。

また、かさ密度との関係については、測定を行った各水分の各温度において、温度伝導率はかさ密度の増加に伴って直線的に増加する傾向が得られた。その一例として、水分10% (w.b.) での小麦粉の温度伝導率とかさ密度との関係を Fig. 6 に示す。図中の実線は次式による計算値である。

$$\kappa_2 = a_4 \rho + b_4 \quad (11)$$

水分10% (w.b.) のときの各温度における式(11)のパラメータおよび標準偏差の値を Table 2 に示す。

4. 比 熱

小麦粉の比熱は、同条件における熱伝導率、温度伝導率、および測定時のかさ密度の値を、それぞれ次の温度伝導率の定義式に代入することによって求めた。

$$\kappa_2 = \frac{\lambda_2}{c_p \rho} \quad (12)$$

その結果、式(12)から推算された小麦粉の比熱は、文献値¹⁾と同程度の値となり、温度、水分が高くなるにつれて直線的に増加した。また、各水分の各温度において、

Table 2 Values of parameters and standard deviations of the equation (11) for wheat flour (moisture content : 10% (w.b.))

Temperature (°C)	a_4	b_4	S.D.*
10	3.06×10^{-11}	5.08×10^{-8}	7.75×10^{-10}
20	3.18×10^{-11}	5.26×10^{-8}	4.29×10^{-10}
30	2.64×10^{-11}	5.73×10^{-8}	2.77×10^{-10}
40	2.56×10^{-11}	6.00×10^{-8}	4.16×10^{-10}
50	2.62×10^{-11}	6.19×10^{-8}	1.19×10^{-9}

* S.D. : standard deviation

比熱は、かさ密度に関係なくほぼ一定の値が得られた。かさ密度 500 kg/m^3 における推算された小麦粉の比熱を、各温度ごとに水分に対してプロットした図を Fig. 7 に示す。図中の実線は、比熱の推算値を次式にあてはめて得られた計算値である。

$$c_p = a_5 M + b_5 T + d_5 M \cdot T + e_5 \quad (13)$$

ここで、 $a_5=2.85 \times 10^{-2}$, $b_5=3.35 \times 10^{-3}$, $d_5=4.65 \times 10^{-6}$, $e_5=1.42$ である。

このように、熱源温度の経時変化のデータを精度良く得ることができれば、式(2)を利用して熱伝導率、温度伝導率、比熱を同時に推算し、さらにこれらの熱物性値を

Fig. 7 Comparison of the specific heat estimated from the equation (12) with the calculated by the equation (13) at five different temperatures of wheat flour (bulk density : 500 kg/m³)

——, calculated from equation (13)

水分や温度の関数として定式化することにより熱計算や加工装置設計などの際の基礎資料として有用となる。

要 約

非定常プローブ法により小麦粉の熱物性を測定した。その結果、以下のことが分かった。

(1) 最小二乗法によりプローブ温度の経時変化のデータを次式にあてはめたところ、次式による計算値と測定値は良く一致した。

$$\Delta\theta = A \cdot \ln t + B + \frac{1}{t} (C \cdot \ln t + D)$$

(2) (1)の結果を踏まえ、熱伝導率と温度伝導率を推算した。熱伝導率 λ_2 、温度伝導率 κ_2 は、水分、温度双方の関数として、それぞれ以下の式で表された。

$$\lambda_2 = a_1 M^2 \cdot T + b_1 M \cdot T + d_1 T + e_1 M^2 + f_1 M + g_1$$

$$\kappa_2 = a_3 M^2 \cdot T + b_3 M \cdot T + d_3 T + e_3 M^2 + f_3 M + g_3$$

また、これらの熱物性値とかさ密度との間に一次の関係が成り立った。

(3) 熱伝導率および温度伝導率の計算結果と、測定時のかさ密度の値から、比熱を推算することができた。

本研究は文部省科研費（一般研究C：課題番号09660276）により行われた。記して謝意を表す。

記 号

γ : オイラー数 0.5772

θ_0 : 試料およびプローブの初期温度 K

θ_1 : t 秒後におけるプローブ自身の温度 K

κ_2 : 試料の温度伝導率 m²/s

λ_2 : 試料の熱伝導率 W/(m·K)

ρ : 試料のかさ密度 kg/m³

b : プローブの外半径 0.0005 m

c_1 : プローブの比熱 J/(kg·K)

c_p : 試料の比熱 kJ/(kg·K)

H : プローブと試料との間の接触熱抵抗 W/(m·K)

M : 水分 % (w.b.)

M_1 : プローブの単位長さあたりの質量 kg/m

q : プローブの単位時間単位長さあたりの発熱量

W/m

T : 温度 °C

t : 加熱経過時間 s

$a_1 \sim a_5, b_1 \sim b_5, d_1, d_3, d_5, e_1, e_3, e_5, f_1, f_3, g_1, g_3$ は定数

文 献

- 1) 日本熱物性学会編：熱物性ハンドブック（養賢堂，東京），p. 439（1989）。
- 2) 松岡孝尚：博士論文（九州大学），p. 4（1985）。
- 3) DROUZAS, A.E. and SARAVACOS, G.D.: *J. Food Sci.*, **53**, 1795（1988）。
- 4) 田川彰男・村田 敏：農業機械学会誌，**57**, 27（1995）。
- 5) BLACKWELL, J.H.: *J. Applied Physics*, **25**, 137（1954）。
- 6) 食品分析研究会：食品分析研究会報告書，p. 21（1973）。
- 7) 粕淵辰昭：農業技術研究所報告 B, **33**, 1（1982）。
- 8) 村田 敏・松岡孝尚：農産物性研究（第1集），農産物性研究グループ編（農業機械学会），p. 140（1979）。
- 9) 山田幾穂：化学工学のための数値計算法（槇書店，東京），p. 29（1988）。

（平成11年5月10日受付，平成11年7月26日受理）