食肉の熱伝導率に及ぼす水分および脂肪含量の影響

宮原晃義*・結城昌夫*・四元康博*・森地敏樹*

Effect of Temperature, Moisture and Fat Contents on the Thermal Conductivity of Meats

Mitsuyoshi MIYAHARA*, Masao YUKI*, Yasuhiro YOTSUMOTO*
and Toshiki MORICHI*

*Lab. Animal Products, Coll. Agr. and Vet. Med., Nihon Univ.
1866 Kameino, Fujisawa-shi, Kanagawa-ken 252

Meat consists mainly of water, protein and fat. The thermal conductivity of meats varies depending on the composition. For measurement of the thermal conductivity, there are two methods, *i.e.*, steady-state method and non-steady-state method. Minced lean meat (beef, pork or chicken) was mixed with different amounts of fat, and the thermal conductivities of these test samples were measured in the temperature range of 5 to 60°C, using a plane heat source method and a heat wire method. In the plane heat source method the thermal conductivity slightly increased with temperature in proportion to the increase of meat sample, while the heat wire method was little or not affected by the temperature. From a practical standpoint, the heat wire method seems to be more convenient than the plane heat source method for the determination of the thermal conductivity of meats. The relations between the moisture content, fat content and thermal conductivity were shown exponential proportion with positive or negative, respectively. The empirical equations for the thermal conductivity of beef were as follows:

$$\lambda_p = -0.217 + 0.008 x_1 + 0.002 x_2$$

$$\lambda_h = -5.214 + 0.078 x_1 + 0.054 x_2$$

where, λ_p and λ_h are the thermal conductivities (W/m·K) by the plane heat source method and the heat wire method, respectively, and x_1 represents the moisture content (%) and x_2 is the crude fat content (%).

(Received Mar. 14, 1995)

食肉の熱伝導率は、水分、蛋白質、脂肪などの主要成分の含有率や食肉の温度によって異なることが考えられる。食肉の通常の加工処理に用いられている -30~100°C の範囲において、特に蛋白質の熱変性 (約 63°C)、脂肪の融解 (約 32°C) ならびに結合水の状態変化により、正確な熱伝導率の測定が難しい。また、一般に複数の物質から構成されている食品の熱伝導率の値は純粋物質に比較して幅が広い¹⁾。

一方、食品の熱伝導率の測定法にはいろいろな方法がある²⁾。また、食品は水分とそれ以外の物体よりなるものとみなして、水分含量から熱伝導率を算出する推定式

も提案されている³⁾。

本研究では平行熱源法⁴⁾と線熱源法⁵⁾を用い、5~60°C の温度域において、食肉中の水分と脂肪含量の相違が熱伝導率にどのような影響を及ぼすかについて比較検討を行った。

その結果、平行熱源法では温度上昇に伴って熱伝導率がわずかに上昇する傾向が観察されるのに対し、線熱源法では温度上昇による影響が少ないことが認められた。また、水分含量と熱伝導率の間には正の指数比例関係、脂肪含量と熱伝導率の間には負の指数比例関係があり、これらの関係推定式を算出したので、その結果を

* 日本大学農獣医学部 (〒252 神奈川県藤沢市亀井野 1866)

報告する。

実験材料および方法

1. 実験材料ならびに試料の調製

実験に用いた牛肉は、神奈川県内で生産されたホルスタイン種雌8才で、と殺後10～15日冷蔵したものであり、豚肉と鶏肉は、それぞれ日本大学農獣医学部付属農場で肥育した豚(LDH)と白色レグホン系の廃鶏から得られたもので、いずれの食肉もモモ肉を用いた。試料の調製は3 mm 孔の挽肉器で2回挽いたモモ肉にそれぞれの脂肪を所定の割合で配合し、乳鉢でよく混合したものを熱伝導率測定用ならびに水分および粗脂肪分の測定用試料として用いた。脂肪の配合割合は平行熱源法では挽肉だけのモモ肉を0%区とし、脂肪をそれぞれ10, 20および30%配合した計4区とした。線熱源法では挽肉だけのモモ肉を0%区として、脂肪を20, 40及び60%配合した区と脂肪だけのものを100%区とし、計5区で行った。

2. 熱伝導率の測定法

(1) 平行熱源法の測定装置は、HILL⁴⁾の装置を参考にして、著者らが新たに考案したもので、この装置はFig. 1に示すとおり、上下1対の円盤型ステンレス製熱源プレート(90 mmφ)に温度が10℃異なる2種類の恒温水を循環させ、上下のプレート間に熱伝導率既知の亚克力板(以下、標準板という)と食肉試料および温度センサー(厚さ0.35×幅5.75 mm)をはさみ、標準板と試料部分を断熱材で覆って、測定したい温度の恒温空気槽に入れ、各部位の温度が定常状態になり安定した時点で、3部位の温度を測定し、計算で熱伝導率を求めるものである。温度センサーの設置部位は標準板と高温面との間 θ_0 、標準板と試料との間 θ_1 、試料と低温面との間 θ_2 のそれぞれの中央部位の3箇所とした。実験では5回測定し、その平均値を求めた。

温度計は理化工業(株)製のDP-2AC型、温度センサーはST-50型(JIS-K)を用いた。恒温水循環槽はNESLAB(株)製Endocal RTE-9B型、ならびにExacal EX-300型に冷却用のEndocal1350型を接続したものを、恒温空気槽はタバイエスベック(株)製のLU-110型を用いた。

(2) 平行熱源法による熱伝導率の算出は、次の計算式で算出した。

$$\lambda_1 \frac{\theta_1 - \theta_0}{d_1} = \lambda_2 \frac{\theta_2 - \theta_1}{d_2} \quad (1)$$

λ_1 …Thermal conductivity of standard plate (W/

Fig. 1 Experimental apparatus of thermal conductivity

(m·K), $\lambda_1 = 0.126 + 0.00025 \theta$)

λ_2 …Thermal conductivity of sample (W/(m·K))

d_1 …Thicknesses of standard plate (5 mm)

d_2 …Thicknesses of sample (5 mm)

θ_0 …Temperature of center between standard plate and high heat source (°C)

θ_1 …Temperature of center between standard plate and sample (°C)

θ_2 …Temperature of center between sample and low heat source (°C)

(1) 式において $d_1 = d_2$ であるから、試料の熱伝導率は次の(2)から算出できる。

$$\lambda_2 = \lambda_1 \frac{\theta_1 - \theta_0}{\theta_2 - \theta_1} \quad (2)$$

(3) 線熱源法は著者が考案した Fig. 1 のようなステンレス製のシリンダー容器を用いた。このシリンダーは厚さ 2 mm, 内径 30 mm, 長さ 110 mm の両端にネジ蓋をつけ、その一方の中心には長さ 10 mm のプローブ挿入用の誘導管を付けた。プローブの大きさは $100 \times 2.5 \phi$ mm であり、シリンダーに前述の肉試料を充填し、恒温水循環槽 (Endocal RTE-9B 型) 内で保温し、試料温度が目的温度 (5, 15, 25, 35, 45, 55°C) で安定した時、サーマルプローブ (TECNET 社製, THRMO TEC VERSION 1.1) を挿入し、熱伝導率を測定した。なお、各温度段階の熱伝導率の測定条件として、サーマルプローブ内蔵のヒーターへの電圧は 5 V, 電力は 0.5 W で加熱した。この時の温度測定は 5 秒間隔で行い 30 回まで測定し、加熱時間の対数値に対して温度が直線的上昇する 4~15 回までの値を用いて指数回帰係数を求めて、各温度段階の熱伝導率を計算した。

実験結果及び考察

1. 試料中の水分と脂肪含量

赤肉に脂肪を所定の割合で配合し、その水分と脂肪含量を常法で測定した結果をそれぞれ Table 1 と 2 に示した。畜種によって異なるが、赤肉の水分ならびに粗脂肪はほぼ 71~75% と 2~5% であり、脂肪部の水分は 3~14%, 粗脂肪は 84~96% であった。

Table 1 Moisture content (%) of meat samples

Plane heat source method			
Amount of fat added to lean meat	Beef	Pork	Chicken
0%	72.5 $\pm$ 0.8	74.3 $\pm$ 0.7	74.8 $\pm$ 0.1
10%	67.7 $\pm$ 0.2	62.7 $\pm$ 0.5	68.6 $\pm$ 0.1
20%	62.4 $\pm$ 0.4	60.7 $\pm$ 0.5	62.1 $\pm$ 0.9
30%	57.6 $\pm$ 0.4	56.2 $\pm$ 0.2	58.4 $\pm$ 0.3
Heat wire method			
Amount of fat added to lean meat	Beef	Pork	Chicken
0%	73.6 $\pm$ 1.2	72.6 $\pm$ 0.2	74.4 $\pm$ 0.3
20%	60.8 $\pm$ 0.8	60.9 $\pm$ 1.0	64.9 $\pm$ 0.2
40%	45.8 $\pm$ 1.1	48.9 $\pm$ 0.0	53.8 $\pm$ 1.5
60%	33.4 $\pm$ 0.9	36.7 $\pm$ 2.2	40.7 $\pm$ 0.9
100%	6.9 $\pm$ 4.2	11.9 $\pm$ 0.2	13.4 $\pm$ 0.7

(AV $\pm$ SD, n=5)

Table 2 Crude fat content (%) of meat samples

Plane heat source method			
Amount of fat added to lean meat	Beef	Pork	Chicken
0%	1.9 $\pm$ 0.1	4.1 $\pm$ 0.1	4.4 $\pm$ 0.1
10%	9.7 $\pm$ 0.6	9.6 $\pm$ 0.4	12.1 $\pm$ 0.9
20%	19.0 $\pm$ 0.1	20.1 $\pm$ 0.4	20.5 $\pm$ 0.4
30%	29.9 $\pm$ 0.5	25.9 $\pm$ 0.1	30.5 $\pm$ 0.4
Heat wire method			
Amount of fat added to lean meat	Beef	Pork	Chicken
0%	2.3 $\pm$ 0.3	3.3 $\pm$ 0.4	4.9 $\pm$ 0.4
20%	19.4 $\pm$ 0.2	19.5 $\pm$ 0.0	19.3 $\pm$ 0.3
40%	38.4 $\pm$ 1.3	34.9 $\pm$ 0.3	34.1 $\pm$ 2.7
60%	55.9 $\pm$ 2.2	53.8 $\pm$ 0.4	52.4 $\pm$ 3.3
100%	92.9 $\pm$ 4.3	85.7 $\pm$ 0.7	85.1 $\pm$ 0.3

(AV $\pm$ SD, n=5)

2. 測定温度が熱伝導率に及ぼす影響

脂肪の配合量を変えた場合の各区の測定温度と熱伝導率との間には、ほぼ一次式の関数関係が認められた。各食肉の結果をまとめて Table 3 に示した。

平行熱源法ではいずれの脂肪配合区でも温度上昇に伴って熱伝導率がわずかに上昇する傾向があり、Table 3 の b 値について 0~30% の 4 区についての全平均値でその傾向をみると、豚肉が最も大きく 0.0030 W/(m $\cdot$ K) であり、ついで牛肉が 0.0020 W/(m $\cdot$ K)、鶏肉では 0.0017 W/(m $\cdot$ K) であった。

これに対し、線熱源法では温度上昇による熱伝導率はわずかに減少した。b 値は、牛肉が最も大きく 0.0026 W/(m $\cdot$ K) であり、ついで鶏肉が 0.0014 W/(m $\cdot$ K)、豚肉では 0.0006 W/(m $\cdot$ K) であった。Table 3 の定数項 a 値は LENTS⁷⁾ の報告では牛赤肉が 0.487 W/(m $\cdot$ K)、豚赤肉は 0.477 W/(m $\cdot$ K) としている。また、HILL⁴⁾ は 0°C の牛赤肉が 0.479 W/(m $\cdot$ K) と報告している。これらの値はいずれも平行熱源法で測定した値であり、本報ではそれよりも低い値が得られ、実験値 (Table 3, 0%, Beef, a, 0.332) との比は 1.4 となった。これは試料が挽肉状態であり、厳密には空気がわずかに混入したことによる差と考えられる。また、水中置換法による密度測定の結果、脂肪の配合により、脂肪 1% 増加当り密度の減少は 0.0013 であった。

Table 3 Effect of temperature on thermal conductivity of meat samples

(W/(m·K))			
Plane heat source method			
Amount of fat added to lean meat	Beef	Pork	Chicken
0%	0.332+0.002 θ	0.386+0.002 θ	0.376+0.001 θ
10%	0.308+0.002 θ	0.315+0.003 θ	0.328+0.002 θ
20%	0.287+0.002 θ	0.273+0.004 θ	0.288+0.002 θ
30%	0.259+0.002 θ	0.249+0.003 θ	0.288+0.002 θ
Heat wire method			
Amount of fat added to lean meat	Beef	Pork	Chicken
0%	0.651-0.002 θ	0.735-0.001 θ	0.584-0.001 θ
20%	0.529-0.004 θ	0.615-0.000 θ	0.507-0.002 θ
40%	0.415-0.002 θ	0.508-0.001 θ	0.438-0.001 θ
60%	0.378-0.002 θ	0.453-0.001 θ	0.345-0.001 θ
100%	0.314-0.003 θ	0.314-0.000 θ	0.291-0.002 θ

$\lambda = a + b\theta$ (λ , thermal conductivity; a, invariable number, b, proportional number; θ , determination temperature (°C).)

Temperature range, 5~60°C.

一般に平行熱源法は温度上昇にともなって熱伝導率は高くなることが知られている⁸⁾。本実験の平行熱源法でも同様であったが、これは標準板の熱伝導率が温度に伴って 0.00025 W/(m·K) 上昇することも 1 つの要因と考えられる。一方、標準板を用いない線熱源法の熱伝導率はあまり変化しなかった。

定常状態で測定する平行熱源法では、ある特定の温度に保たれている時、食肉内の脂肪を構成する固体と液体の割合は変化せず、両者は共存すると考えられる。また、線熱源法では、ある温度の試料の内部を細線で加熱して非定常状態を作り、この時の温度を測定するため、食肉中の脂肪は加熱に伴って固体から液体へ状態変化する温度域もある。この時に脂肪の融解潜熱がわずかに影響するものと考えられる。

示差走査熱量計 (DSC) を用いて豚脂肪の融解熱量を測定した結果、豚脂の融解は約 24°C から始まり、32°C でピークになり、39°C まで続いた。この間の融解熱量は 2.5 mJ/mg であった。このことから食肉の熱伝導率は、その測定法によってわずかに異なった値を示すと推測される。一般に熱伝導率は温度に伴って上昇するとされていることを考慮すれば、平行熱源法が妥当であるが、食

肉などの場合は測定の簡便さから見ると実用的には線熱源法がすぐれていると考えられる。

3. 水分と脂肪含量が熱伝導率に及ぼす影響

各畜肉の水分含量と脂肪含量が熱伝導率に与える影響を比較するため Table 3 にその関係を示した。定数項 λ の値を y 軸としてプロットし、平行熱源法による結果を Fig. 2 に、線熱源法による結果を Fig. 3 に示した。両方法とも水分含量の増加は熱伝導率を高くし、脂肪含量の増加は逆に熱伝導率を低下させた。また、平行熱源法では線熱源法よりも低い値が得られた。さらに、これらの成分含量と熱伝導率には指数関数の比例関係が認められたので、最小自乗法を用いて推定式を算出し Table 4 に示した。

実際の食肉では水分と脂肪は一方が増加するともう一方は減少する関係にあることから水分と粗脂肪含量の二成分因子から熱伝導率を推定するために多変量解析⁹⁾で推定式を算出し Table 5 に示した。この値は 5~60°C の温度範囲の熱伝導率を平均値で示した。牛肉の値については次式が得られた。

$$\lambda_p = -0.217 + 0.008x_1 + 0.002x_2 \quad (3)$$

$$\lambda_h = -5.214 + 0.078x_1 + 0.054x_2 \quad (4)$$

Fig. 2 Effect of moisture and the crude fat contents of meats on the thermal conductivity determined by plane heat source method

●, beef ; ○, pork ; ×, chicken.
—, moisture ; ----, crude fat.

Fig. 3 Effect of moisture and crude fat contents of meats on the thermal conductivity determined by the heat wire method

●, beef ; ○, pork ; ×, chicken.
—, moisture ; ----, crude fat.

Table 4 Exponential functional equations of the thermal conductivity, moisture and crude fat composition of meat

(W/(m·K))						
Moisture						
Kinds of meats	Plane heat source method			Heat wire method		
	B	A	r	B	A	r
Beef	0.102	+0.016 x	0.994	0.275	+0.011 x	0.974
Pork	0.066	+0.024 x	0.973	0.267	+0.014 x	0.998
Chicken	0.103	+0.017 x	0.974	0.236	+0.012 x	0.978
Crude fat						
Kinds of meats	Plane heat source method			Heat wire method		
	B	A	r	B	A	r
Beef	0.337	-0.009 x	-0.999	0.617	-0.008 x	-0.969
Pork	0.100	-0.019 x	-0.976	0.750	-0.010 x	-0.996
Chicken	0.380	-0.011 x	-0.919	0.595	-0.009 x	-0.985

$\lambda = A \cdot e^{Bx}$ (λ , thermal conductivity ; A, invariable number ; B, proportional number ;

x, moisture or crude fat content (%).)

r, correlation coefficient.

Table 5 Multiple correlation equation of the thermal conductivity for moisture and crude fat composition of meats

(W/(m·K))

Kinds of meats	Plane heat source method			
	A	B	C	r
Beef	-0.217	+0.008 x ₁	+0.002 x ₂	0.999
Pork	0.390	+0.000 x ₁	-0.006 x ₂	0.961
Chicken	-0.284	+0.009 x ₁	+0.002 x ₂	0.907

Kinds of meats	Heat wire method			
	A	B	C	r
Beef	-5.214	+0.078 x ₁	+0.054 x ₂	0.991
Pork	0.171	+0.007 x ₁	+0.001 x ₂	0.986
Chicken	3.172	-0.033 x ₁	-0.029 x ₂	0.999

$\lambda = A + Bx_1 + Cx_2$ [λ , thermal conductivity ; A, invariable number ; B, C, proportional number ; x₁, moisture (%), x₂, crude fat (%).]
r, correlation coefficient.

ここでの λ_p …平行熱源法による熱伝導率, λ_h …線熱源法による熱伝導率, x₁…水分(%), x₂…粗脂肪(%)

計算の結果, 相関係数は低い場合でも 0.88, 高いものでは 0.99 であることから, それぞれの水分と脂肪含量から熱伝導率を近似的に推定することが可能であると考えられる。

要 約

熱伝導率の測定法には定常法と非定常法がある。挽肉(牛肉, 豚肉, 鶏肉)に脂肪を配合して平行熱源法と線熱源法を用いて 5~60℃ の温度域における熱伝導率を測定した。

その結果, 平行熱源法では温度上昇に伴って熱伝導率がわずかに上昇する傾向が観察されるのに対し, 線熱源法では温度上昇による影響が少ないことが認められた。また, 水分含量と熱伝導率との間には正の指数比例関係, 脂肪含量と熱伝導率との間には負の指数比例関係があり, この 2 成分因子から熱伝導率を求める推定式は牛肉では次のとおりであった。

$$\lambda_p = -0.217 + 0.008x_1 + 0.002x_2$$

$$\lambda_h = -5.214 + 0.078x_1 + 0.054x_2$$

ただし, λ_p , λ_h はそれぞれ平行熱源法及び線熱源法による熱伝導率 (W/(m·K)), x₁…水分(%), x₂…粗脂肪(%)。

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 (1990).
- 2) MOHSENI, N.N. : Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials, (Gordon & Brach, New York), p. 86 (1980).
- 3) SWEAT, V.E. : *J. Food Sci.*, **39**, 1080 (1974).
- 4) HILL, J.E., J.D. LEITMAN and J.E. SUNDERLAND : *J. Food Technol.*, **21**, 1143 (1967).
- 5) SWEAT, V.E. and C.G. HAUGH : *Trans. of the ASAE*, **17**, 56 (1974).
- 6) 石原辰雄・長谷川勝也・川口輝久 : Lotus 1-2-3 活用多変量解析. (共立出版, 東京). p. 10 (1990).
- 7) LENTZ, C.P. : *J. Food Technol.*, **15**, 243 (1961).
- 8) PHAM, Q.T. and J. WILLIX : *J. Food Sci.*, **54**, 508 (1989).

(平成 7 年 3 月 14 日受理)