



Title	畜肉及び魚肉の凍結点以上における熱的性質の再検討(農業工学科)
Author(s)	國府田, 佳弘; 泉, 裕已; 秋永, 孝義
Citation	琉球大学農学部学術報告 = The Science Bulletin of the Faculty of Agriculture. University of the Ryukyus(26): 353-360
Issue Date	1979-12-11
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/4167
Rights	

畜肉及び魚肉の凍結点以上における 熱的性質の再検討

國府田 佳 弘*・ 泉 裕 巳*・ 秋 永 孝 義*

Yoshihiro KOHDA, Hiromi IZUMI and Takayoshi AKINAGA :
Reinvestigation of thermal properties of animal and
fish flesh above freezing point

I 緒 言

食品の冷凍時間及び冷量の計算にはPlankによって基礎をたてられ発展して来た方法が広く用いられているが、実際には食品の冷凍は境界層が移動する伝熱の問題、すなわちNeumann問題として解かれるべきものと考えられる。一部で、この方法によってバターなどを材料として試算した例³⁾もあるが、実際問題として冷凍時間、冷量が更に厳密に求められなければならないのは魚類、畜肉等についてである。

冷却時間や冷量などを厳密に計算するためには、これに見合うだけ十分な精度の試料の物性値が求められていなければならない。そこで、まず畜肉及び魚肉の熱的性質、特に熱伝導率の詳細な値を我国の産物について求めたところ、従来用いられている外国の例などとはかなり異なり、従来の計算方法によるものとも相当な差を生じることがわかったので、先ず本報では凍結点以上における測定結果について報告する。

II 試料及び実験方法

1 試 料

供試材料は畜肉の場合は福岡食肉市場で得られた豚及び牛肉を、また魚肉は福岡中央魚市場に水揚げされたインドマグロ及びブリを使用し、更に市販のクジラ肉をも供試した。これらを一覧にすると表1のとおりとなる。ただしクジラについては冷凍品を5℃の冷蔵庫で解凍したものを使用した。

表1 供試材料

試料名	死後経過日数	備 考
豚ロース	0~1	中型 ヨークシャー
豚モモ		
豚バラ		
牛ロース	0~3 (推定)	
牛モモ		
牛カタ		
インドマグロ赤身	-	水 揚 当 日
ブ リ	0	
クジラ	-	冷 凍 品

* 琉球大学農学部農業工学科

2 熱伝導率の測定

熱伝導率の測定には平衡熱流による方法と周期的温度変動による方法¹⁾とがあるが、本報においては後者を用いた。すなわち図1のように加熱板上に試料の十分大きなブロックを置き、ヒーターに加える電流を調節して材料表面に

$$t_0 = t_{0M} \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau_0}\right) \dots\dots\dots (1)$$

なる周期変動温度を与えれば、これから垂直に x cm 離れた試料内の温度 t_x は

$$t_x = t_{0M} \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{\alpha\tau_0}} \cdot x\right) \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau_0} - \sqrt{\frac{\tau}{\alpha\tau_0}} \cdot x\right) \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。ただし

- t_{0M} : 試料の表面最高温度
- τ_0 : 温度変化の周期
- τ : 経過時間
- $\alpha = k/\rho C$: 熱拡散系数
- k : 試料の熱伝導率
- C : 試料の定圧比熱
- ρ : 試料の密度

とする。

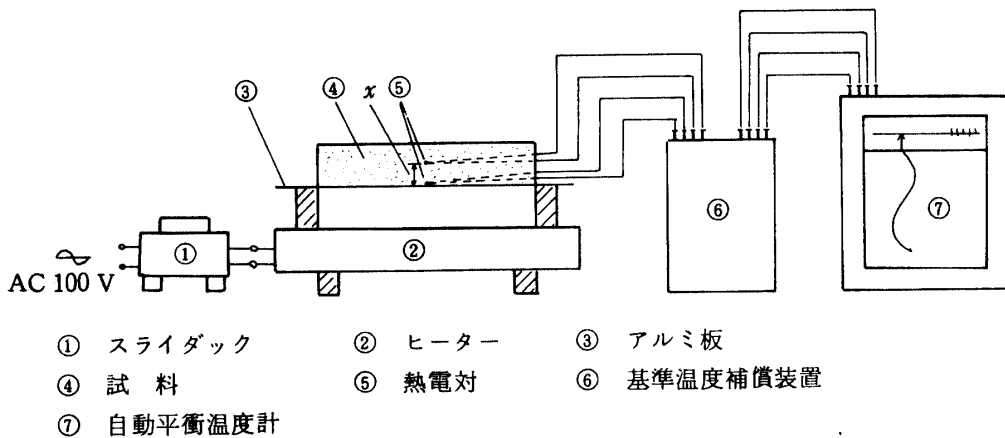


図1 熱伝導率測定装置

したがって、 t_x の位相の遅れ時間 τ_1 は

$$\tau_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau_0}{\alpha\pi}} \cdot x \dots\dots\dots (3)$$

となり、また振幅 t_1 は

$$t_1 = t_{0M} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{\alpha\tau_0}} \cdot x\right) \dots\dots\dots (4)$$

となるから τ_1 、 t_1 を測定すれば熱拡散系数 α を求め得る (図2参照)。このようにして求めた α と後述の方法に従って求めた ρ および C を用いて熱伝導率 k を算出した。

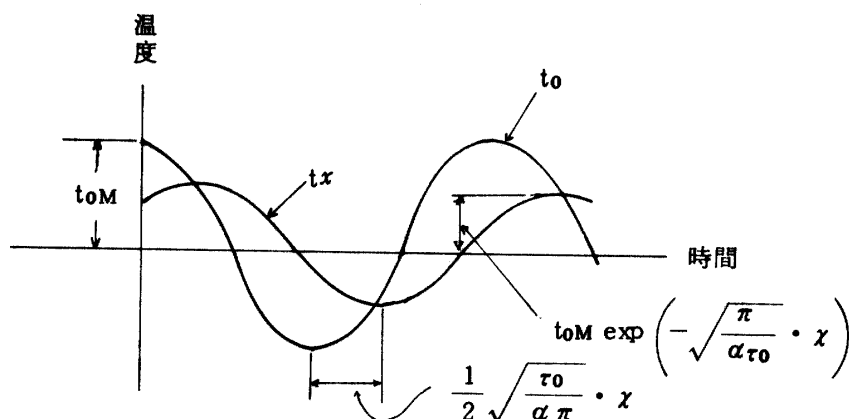


図2 表面温度変動と内部温度変動

試料の大きさは、重量1 kg内外で厚さ4 cm程度ブロックとした。ただし、プリの場合は十分に大きなブロックとすることができないので、三枚におろした肉部を重ね合わせて試料とした。これらの試料は均質なものを得るためにできる限り脂肪の少ないところを採取した。

熱電対の接点位置は試料中心軸上の伝熱板との接触面、及びこれらの直上2 cmの点とした。

たんぱく系食品の温度-エントロピー曲線は凍結点以上ではほとんど直線状であり⁵⁾、その比熱は凍結点以上ではほとんど一定と考えてよいから、既存のデータと比較するためには1点ないしは小範囲でよく、熱伝導率の測定は比熱の測定と同じ温度にする必要はないので、測定は気温25～28℃の室内で行ない、変動温度の振巾は15℃内外とし、周期は60分内外とした。

なお、温度変動はスライダックで電圧を調整して与え、加熱板は21.6×190×0.09 cmのアルミニウム板を用い、記録は千野製作所製の記録温度計ET 1200型を使用した。

3 比熱の測定

比熱の測定は混合法によった。すなわち魔法びんに2～4℃の冷水100 gをとり、平均10 gの試料を投入し、臨界温度に達するまでの温度変化と測定値の特性に基づく修正量とから測定した。ただし、温度測定には温度計から伝わる熱を少なくするために熱電対（銅-コンスタンタン）を用い、横河電機製の記録電圧計LER 12 Aに記録させ、臨界点の判定は図3に示すように装置の温度上昇曲線と試料の投入によって生じたプラトーの延長直線との交点をもってした。

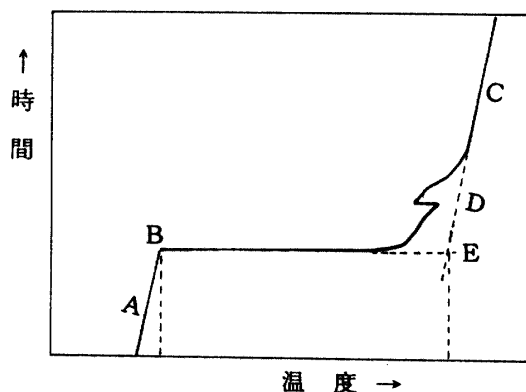


図3 臨界温度の判定

4 密度、水分及び脂肪含量の測定

密度は4～5 cm³の直方体状の試料を水と置き換えて容積を測定して求め、水分の測定はカールフィッシャー法により、また脂肪の測定はソックスレー法によった。

III 実験結果及び考察

1 比熱及び熱伝導率

上述の方法により測定した試料の諸物性値を一覧にすると表2のとおりとなった。表中の乾物比熱というのは、試料の熱容量から水の熱容量を引いて乾物量で除して得た値である。またクジラの比熱が0.90 kcal/kg °Cと非常に大きいのは解凍品であるために組織構造が若干異なっているためと思われる。

表2 熱的諸性質の測定結果 (20~50 °C)

試料名	水分 %	脂肪 %	密度 g/cm ³	比熱 kcal/kg °C	乾物比熱 kcal/kg °C	熱拡散係数 cm ² /min	熱伝導率 kcal/m·hr °C
豚ロース	75	4.5	1.13	0.84	0.36	0.12	0.68
豚モモ	67	2.6	1.03	0.76	0.27	0.14	0.66
豚バラ	68	4.4	1.01	0.80	0.37	0.14	0.66
牛ロース	65	5.8	1.06	0.77	0.34	0.13	0.63
牛モモ	70	0.9	1.07	0.77	0.23	0.13	0.64
牛カタ	75	2.7	1.12	0.83	0.32	0.13	0.75
クジラ	66	6.0	1.01	0.90	0.71	0.11	0.60
インドマグロ赤身	55	6.0	1.06	0.73	0.40	0.06	0.30
ブリ	69	3.6	1.10	0.79	0.32	0.16	0.82

この表に示した結果によれば豚肉の方が牛肉の場合よりも大きい乾物比熱を示す傾向があり、また豚、牛のいずれの場合もモモ肉の乾物比熱は他の部位に比較して著しく小さい。しかし生肉としては種類や部位によって目立った差は認められない。

一方Riedelらは実験的にたんぱく系食品の比熱は含水量が $\alpha\omega\%$ のとき

$$C = 0.6 \alpha\omega + 0.40 \text{ [kcal/kg} \cdot \text{°C]} \quad \dots\dots\dots (5)$$

で表わされるとしている⁶⁾。いま著者らの実験に使用した試料に(5)式を適用すれば表3のとおりとなり、実際の測定値よりも0~10%程度高い値となる。もともとRiedelらの式は魚類を主対象として作成されたもので、この場合もマグロについては良く一致している。

次に熱伝導率について考察を加える。現在我国で用いられている食肉の熱伝導率の値は主にTammら⁵⁾、Miller⁴⁾、あるいはWoodamsら⁹⁾によって測定されたもので、凍結していない畜肉の場合には0.41~0.48 kcal/m·hr·°Cの範囲であるのに対し、われわれの測定によれば0.60~0.75 kcal/m·hr·°Cと、これよりもかなり大きい値を示している。我国産の畜肉について比較すべき他の測定例は見当たらないが、田中が求めた例⁷⁾ではクジラの赤肉が0.71、成鶏肉が0.62 kcal/m·hr·°C (いずれも水分約72%)とほぼ著者らの場合と同範囲の値を示している。

表2においてマグロの熱伝導率の値が他の試料に較べて特に低いのはマグロの身肉の構造が腱状隔膜を境界とする層状になっているためと考えられる。また、ここに示したマグロの熱伝導率の値は前述の外国において測定された値の例と大差がない。

上述の食肉の熱伝導率の値を含水量に対してプロットすると図4のようになり、比熱の場合と同様に水分の増加に伴ない増大する傾向にあり、極く大まかに

$$k = \frac{\alpha\omega - 3}{100} \text{ [kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot \text{°C]} \quad \dots\dots\dots (6)$$

65 < $\alpha\omega$ < 75, 20 °C 前後
と表現できることがわかる。

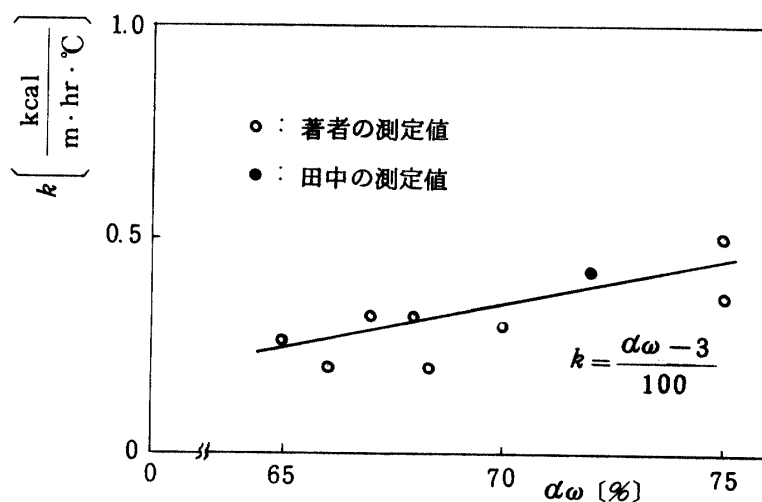


図4 含水率 $\alpha\omega$ と熱伝導率 k の関係

ここで問題となるのは、畜肉の熱伝導率の測定値が、いずれも水の熱伝導率よりも大きい値を示すことである。水を含む均質な固形物であれば熱伝導率は図5の鎖線のように乾物の場合の値から水分の増大に伴って増大し、究極的に水の熱伝導率の値に収斂するものと考えられる。しかし上述の測定値に

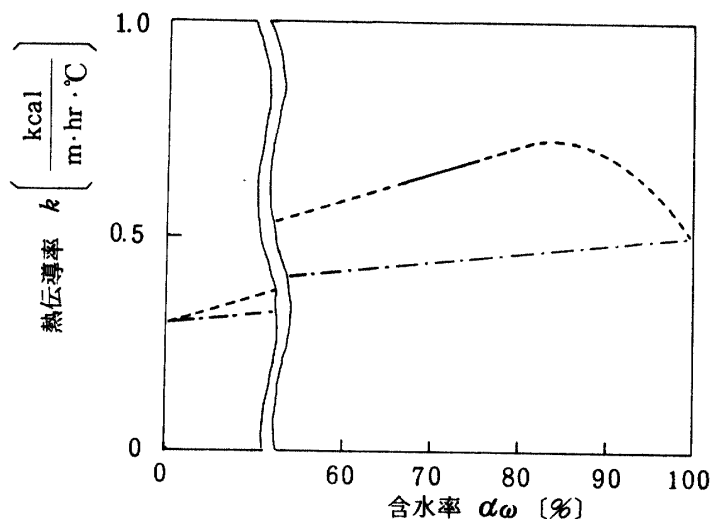


図5

よれば、同図中の破線および実線の過程をとらねばならず一見不合理に思われるが、これは均質な固形物と考えるからであって、畜肉など細胞、組織を持ち含水量の大きいものでは細胞内ないしは組織内での対流あるいは物質移動が当然考えられるので、かたまりとしての見かけの熱伝導率よりも大きな値を示したとしても不自然ではなく、また水分含量が極端に大きくなった場合でも水の熱伝導率の値に近づくとは限らない。マグロの熱伝導率の値が小さいのはその層状構造のために、このような形での熱の移動が少ないためであろうと思われる。

表3 比熱の実測値と計算値との比較

試料名	測定値(1)	Riedelの方法による計算値(2)	(1)-(2)
	kcal / kg °C	kcal / kg °C	(1) %
豚ロース	0.84	0.85	-1.2
豚モモ	0.76	0.80	-5.3
豚バラ	0.80	0.81	-1.3
牛ロース	0.77	0.79	-2.5
牛モモ	0.77	0.82	-6.5
牛カタ	0.83	0.85	-2.4
クジラ	0.90	0.80	11.0
インドマダゴ赤身	0.73	0.73	0
ブリ	0.79	0.81	-2.5

2 冷蔵への応用

Tamm らが求めた値と著者が求めた値とが異なることは、これが外国産の畜肉と我国九州産の畜肉との差であるか、あるいは測定温度範囲、測定法などの測定条件の差によるものであるかは、これだけの実験では明確でないが、共通海域でとれる魚の肉がほぼ同じ測定値を示すことから考えれば上述の差は地域差と考えることが妥当であろう。そのような立場に立てば九州産の畜肉は比熱が小さく熱伝導率が大きいので比較的冷凍しやすいとすることができる。ちなみにRiedel らの方法によって求めた比熱及びTamm らの熱伝導率の値を用いた場合と、著者の測定値を用いた場合との冷凍時間などを一般に行なわれている方法で求めて比較してみる。ただし、これまで述べたものは凍結点以上の温度での値であるから冷蔵ないしは予冷の場合を想定する。

冷凍機械工学ハンドブックによれば⁸⁾温度 θa °C のものを θe °C の室内で θb °C まで冷却するに必要な時間 t は

$$t = \frac{\rho C}{4\mu k} D \left(D + \frac{4k}{\alpha'} \right) 2.3 \log \frac{\theta a - \theta e}{\theta b - \theta e} \dots\dots\dots (7)$$

で表わされる。ここで

- μ : 試料形状の次元率 [-]
- D : 試料の平均厚み [m]
- ρ : 試料の密度 [kg/m³]
- C : 試料の比熱 [kg/kg °C]
- α' : 試料の表面と冷媒との間の熱伝達率 [kcal/m² · hr · °C]
- k : 試料の熱伝導率 [kcal/m² · hr · °C]

である。

これを用いて初期温度 20 °C の牛肉の試料をN社の標準の段ボール箱のうち 0.470 × 0.335 × 0.175 m の大きさの箱にカット肉として詰め、室温 -3 °C の部屋で冷蔵するものと仮

表4 冷却時間及び冷量の比較

(初期温度 20 °C, 終温 2 °C, 室温 -30 °C)

試料名	著者の物性値による場合		Tamm, Riedelらの物性値による場合	
	時間 hr · min	冷量 kcal	時間 hr · min	冷量 kcal
豚ロース	14.13	605	18.41	612
豚モモ	11.41	487	17.02	513
豚バラ	12.17	513	15.55	520
牛ロース	12.43	522	17.03	556
牛モモ	13.05	590	18.50	604
牛カタ	12.37	519	16.29	532

定したときに、試料の平均温度が 2°C まで下るに必要な時間と冷量とを比較すると、両者はそれぞれ表4のようになる。ただし $\alpha' = 10 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$ とした。比熱にはそれほど大きな差がないので表4においても両者の正味冷量には大差がないが、熱伝導率の差が大きいためから25~30%ほど従前の値を用いた場合よりも短い時間でよいことがわかる。このことは厳密な計算法によらず、通常の計算法をもってしても、従前の物性値を用いればかなり大きな誤差を生じることを示唆しており、今後更に総合的にたんぱく系食品の熱的性質を追究する必要がある。

最後に本研究の試料入手に際して便宜をおはかりいただいた福岡食肉衛生検査所、日本食品工業株式会社および福岡市場検査室に厚くお礼申し上げます。

IV 要 約

食肉などの冷凍時間を厳密に計算する目的で、我国産の畜肉及び魚肉の熱的性質を測定したところ、従来用いられている物性値と次の点で異なっていた。

1. 比熱は Riedel らの方法によるものよりもわずかに小さかった。
2. 熱伝導率は従来用いられている Tamm, Miller らの値よりも畜肉の場合はかなり大きく、 $0.63 \sim 0.75 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$ であった。一方魚肉の場合は従来のものと大差なかった。
3. 著者らの測定値を用いて冷却時間を計算すると、従来用いられていた物性値によって計算したものよりも25~30%ほど短い。

V 引 用 文 献

1. Eckert, E. R. G., and Drake, R. M. 1960 Heat & mass transfer 2nd ed., p.97~107, New York, Mcgraw Hill
2. 加藤舜郎 1959 食品冷凍法 p. 30, 東京, 恒成社厚生閣
3. 小森友明, 平井英二 1968 境界面の移動を伴う非定常伝熱, 化工誌, 32: 154~158
4. Miller, H. L. and Sunderland, J. E. 1963 Thermal conductivity of beef, Food Tech., 17: 490
5. 中出政司 1963 食品工業の冷凍, 初版, p. 18, 東京, 光琳書院
6. _____ p. 28
7. 内田秀雄ほか, 1965 冷凍機械工学ハンドブック, p. 814, 東京, 朝倉書店
8. _____ p. 819
9. Woodams, E. E. and Nowrey, J. E. 1968 Literature Values of thermal conductivities of food, Food Tech., 22: 494~502

Summary

In order to calculate cooling time of proteinous foods, thermal properties of animal and fish flesh were studied. Specific heats of those were 1.2~0.75 kcal/kg°C which were smaller than values calculated by Riedel's method. Thermal conductivities were 0.63~0.75 kcal/m.hr°C, which were larger than Tamm's value. These values were considered to be larger than that of water because the heat transfer in this case was followed by convection and mass transfer. Cooling time calculated in this study was smaller than that calculated by usually used data.