

加熱用食品素材モデル系の試作と その有効熱伝導率

長尾慶子

1. 緒言

食品素材の加熱は長い歴史をもつ重要な調理操作であり、素材の種類と調理法に適した多くの加熱方法や加熱用調理器具が経験の中から選択されている。これらはいずれも、素材の特性を生かし、美味で消化・吸収の良い食べ物を調製するために必要な操作である¹⁾。しかし、熱媒体の種類の多様性と、食品素材の不均質性のため加熱調理における熱エネルギーの移動を、あらゆる素材と加熱法について定量的に記述することは困難である。

食品素材は低分子から高分子にいたる生体成分よりなり、およそ水溶性ないしは親水性化合物からなる区分と、脂溶性ないしは親油性化合物の区分との混合物であるので、その状態は異質の成分が互いに接する界面の面積が広大な分散系のそれに擬せられる²⁾。しかも、加熱により比較的低い温度領域で変性や糊化等の状態変化を起こすことが多い。このような不均質で熱応答性の高い食品素材を加熱した場合の、熱媒体と食品素材との間の伝熱機構や素材内部での熱エネルギーの移動が

定量的に明らかにされれば、経験的要素の多い調理分野での科学的理解に大いに役立つであろう^{3), 4)}。

そのための試みとして、単純な組成の加熱用食品モデル系を調製し、内部の熱移動におよぼす成分のおよび操作的な要因を明らかにすることを考えた。今までの加熱実験の流れの中で、水分の影響が大きいことが予測されたので、その試みの一端として、食品成分のうちほとんどの食品素材に含まれ、かつ熱移動の成分的要因になると考えられる水分に注目し、一定量の固形成分に対して水分量を変化させ得るモデル系の試作・調製を行なった。同時に定常状態における熱伝導率を測定する装置を製作し、試作モデル系の有効熱伝導率におよぼす水分量および加熱温度の影響を測定した。これまでに得られた結果を、以下に報告する。

2. 実験方法

(1) 食品素材モデル系の調製

食品素材のモデル化にあたり意図したことは、水分量を変え得る単純な組成の系であり、

Table 1. Composition of a series of the model systems to be tested.

Water in liquid phase	0%	20%	40%	60%	80%	100%
Water (g)	0	3.0	7.4	11.9	17.6	23.2
Corn oil (g)	7.8	12.2	11.0	7.9	4.4	0
Moisture* (%)	7.1	12.6	20.9	29.3	39.0	48.7

Solid phase : Mixture of cocoa powder and wheat flour with 15g either.

*The values contain moisture of the solid phase.

しかも一連の加熱操作を通して可及的に一定の保形性が維持できるものとした。予備実験を重ねた結果今回の研究に採用した一連のモデル系の組成をTable 1.に示す。

このモデル系は、水とコーン油とを任意の量比で混合した液体相中に、固体相としてのココア粉末と小麦粉の等量混合物を分散させた系である。固体相の両成分に含まれる水分を考慮しても、成分の種類を変えことなく一定の形状を保ちながら全水分量を7%から約50%までの範囲で変化させ得る一連のモデル系を調製することができた。

使用したココア粉末はVan Houten製の市販純ココアであり、その組成は水4%、脂質22%、たんぱく質19%、炭水化物46%、灰分8%、および少量の酸化重合物からなる。また調製時に熱処理を受けているので各成分の熱安定性が高く、水および油脂のいずれにも分散して高い粘稠性を持つため、水分量の異なるモデル系の調製には好都合の素材である。

一方の小麦粉は膨潤・糊化等の熱応答性のあるでんぷん含量が高く、小麦粉中のグルテン成分は水分量の多いモデル系の保形性に寄与すると考えられる。使用した小麦粉は、日清製粉(株)製の市販薄力粉フラワーであり、約14%の水分を含有する。

液体相を構成するコーン油は、味の素(株)製の市販品を用いた。コーン油は、揚げ加熱に汎用される熱媒体であることが使用した理由である。

モデル系を試作するに際し、水分量を変えながら保形性のある系を混ねつ・調製するためには、試行錯誤により一定量の固体相に対する液体相添加量を微妙に調整する必要があった。そこで、一定量の固体相と混合する一連の液体相の適量を実験的に求めるため、コーン油にあらかじめ2%のSpan 80(ソルビタン・モノオレート、和光純薬(株)製)を溶

存させ、これに所定量の水を加えて調製したエマルションを液体相とした。このようにして固体相と混合する一連の液体相の適量を決定したのがTable 1.に示す数値である。

適量の水とコーン油の液体相を100回攪拌し、ここに小麦粉とココア粉末の等量混合物の固体相を加えて混ねつし、以下の測定用試料を調製した。

(2) 有効熱伝導率の測定

純物質に固有の熱伝導率については、既に正確な実測値が種々のデータブックに記載されているが、食品成分に関するこの種の情報には乏しい。特に多成分の分散系である食品の場合は、個々の成分の固有値をもとに概算する方法もあるが、正確には系全体の有効値を実測しなければならない⁵⁾。

本研究で用いた熱伝導率測定装置は、大阪府立大学名誉教授松本幸雄氏が新規に設計し、新東科学株式会社に製作を委託したものである。その見取り図をFig. 1に示す。

この測定装置の特徴は、バーニアスケールで1/100mmの精度で上下動させることができ試料の正確な厚みの測定が可能であること、低熱源部に脱着可能なテフロン製の円筒をつけ液状試料も測定が可能であること、各熱源には2台のハーケ製循環恒温槽から一定温度の水を循環させ長時間安定した温度設定ができること等である。

製作した測定装置の原理はFig. 2に示したが、熱伝導率既知のポリカーボネートを基準物質に用い、平行熱流を利用した相対的方法⁶⁾によるものである。

一般に、高・低熱源間の温度勾配($\partial T/\partial y$)に基づき熱エネルギー(q)の輸送が起こるが、その量すなわち熱流束は次のFourier則にしたがう。

$$q = -\lambda (\partial T/\partial y) \quad (1)$$

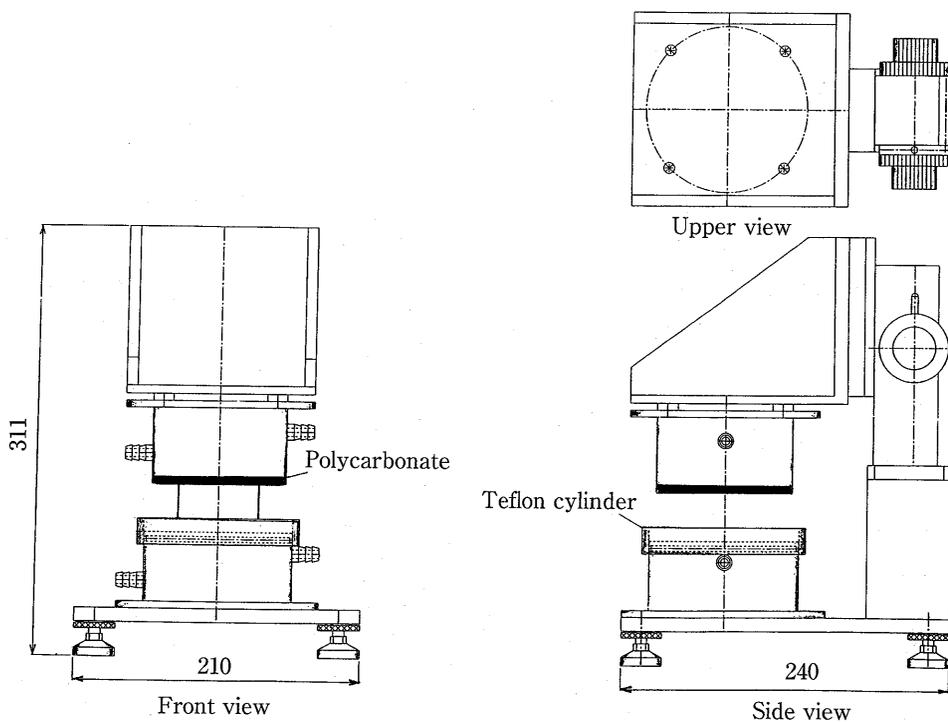
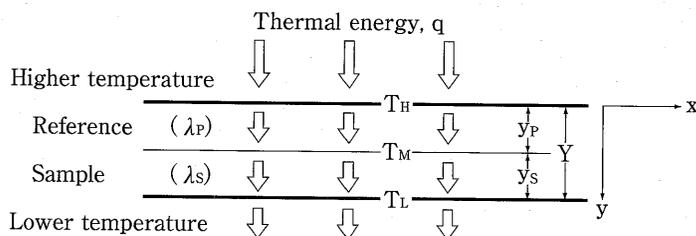


Fig.1 Apparatus for measuring the thermal conductivity (designed by Dr. S. Matsumoto)



λ_p, λ_s : Thermal conductivity of reference and sample
 T_H, T_M, T_L : Temperature at each interface

Fig.2 Schematic illustration of the principle for measuring thermal conductivity.

ここに、 λ は温度勾配中に存在する物質の熱伝導率である。定常状態において輸送される熱エネルギーの量は、高熱源と低熱源との温度差 ($T_H - T_L$) と熱伝導率との積に比例し、熱エネルギーの移動距離に逆比例するが、さらに Fig. 2 のように両熱源間に基準物質と試料層が存在するとき、その接触面の温度を T_M とすると、次の関係が成立する。

$$\lambda_p (T_H - T_M) / y_p = \lambda_s (T_M - T_L) / y_s \quad (2)$$

ここに、 λ_p と λ_s は基準物質と試料の熱伝導率、 y_p と y_s はそれぞれの厚さである。したがって各温度、基準物質と試料層の厚さ、および基準物質の熱伝導率から、次の関係を用いてモデル系の有効熱伝導率を求めることができる。すなわち、

$$\lambda_s = \lambda_p (T_H - T_M) y_s / (T_M - T_L) y_p \quad (3)$$

高低両熱源には2台の恒温水槽からそれぞれ所定温度の水を循環させ、5℃の温度勾配を与えた。このようにして、一連のモデル系の有効熱伝導率には30℃から80℃の温度範囲で測定した。その際、試料層内部の対流や装置周辺部温度の影響を避けるため、試料層の厚さを5mm以内とした。前述のように、ポリカーボネートを本測定の基準物質に用いたが、その厚さは5.95mm、熱伝導率は $0.21 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ である。装置各部位の温度測定には、厚さ0.05mmの帯状K熱電対（アンリツ計器(株)製）を使用した。

3. 結果および考察

(1) 加熱用食品素材モデル系の保形性

水分量の異なる一連のモデル系をそれぞれ直径30mmの球に成型し、それらを各種の熱媒体中に10min置いて保形性を観察した結果、天火加熱や蒸し加熱のように熱媒体が気相の場合はいずれもその形状がほぼ維持された。なお加熱温度は天火加熱で200℃、蒸し加熱で100℃である。

これに対し170℃のコーン油を熱媒体とする揚げ加熱では、モデル系液体相中の水分量が50%以下になると、固体相特にココア成分が系の表面から揚げ油中へ分散し保形性が失われるが、液体相の水分量が55%を越え

ると、モデル系の形状はほぼ完全に維持された。

茹で加熱に相当する熱水中では、モデル系の液体相水分量が0%および50%以上においていずれもモデル系の形状が維持された。前者の場合、モデル系の固体相表面が親油性であるため、熱水中への固体相の分散が抑制されると考えられる。これに対し後者の水分量50%以上のモデル系では、小麦粉中のグルテン成分によるグルテンマトリックスの形成とでんぷん成分の糊化とに必要な水分が与えられているので、熱水中で保形性が維持できる。しかし、液体相の水分量が50%以下のモデル系で揚げ油中への成分の分散が生じたのは、固体相表面の親油性の低下、および不十分なグルテンマトリックス形成とでんぷん糊化等に起因した保形性の不足によるものと考えられる。このような一連のモデル系の保形性に関するレオロジー的考察については今後の検討課題である。

いずれにしても、保形性に関して小麦粉成分中のグルテンやでんぷんの重要性が認識できた。そこでモデル試料の固形相の全部を小麦粉のみにして、調製した小麦粉試料ドウの熱伝導率を同様に測定した。その組成表をTable 2に示す。

(2) 有効熱伝導率に及ぼす水分量の影響

モデル系および小麦粉ドウの有効熱伝導率測定結果をFig.3-1, Fig.3-2に示したが、一連

Table 2. Composition of a series of the model systems (Wheat flour)

Water in Liquid phase	0%	20%	40%	60%	80%	100%
Water (g)	0	2.5	6.0	9.0	11.2	14.0
Corn oil (g)	11.5	10.0	9.0	6.0	2.8	0
Moisture* (%)	10.1	15.8	22.7	29.3	35.0	41.4

Solid phase : Only wheat flour 30g.

*The values contain moisture of the solid phase.

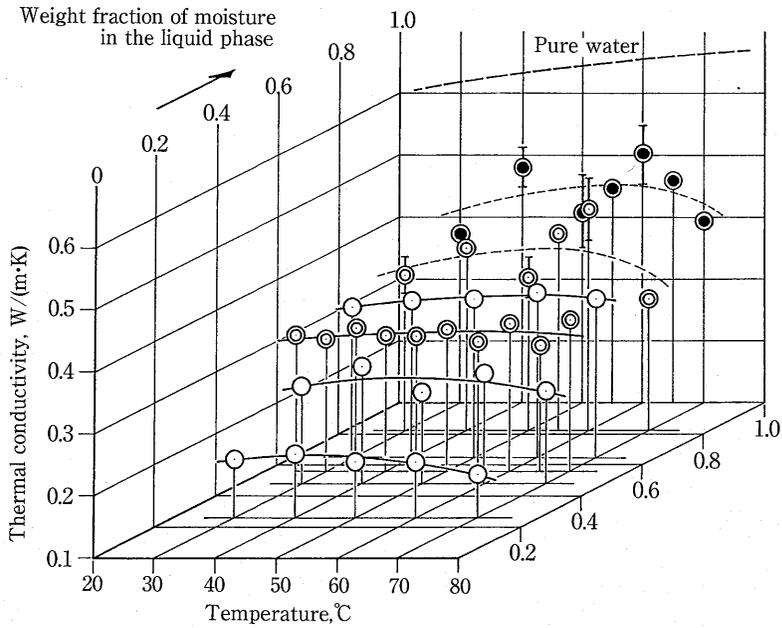


Fig.3-1 Measured thermal conductivity of a series of the model systems
 Solid phase : wheat flour / cocoa powder=1/1 in w/w
 Liquid phase : water/corn oil, definite ratio in each sample

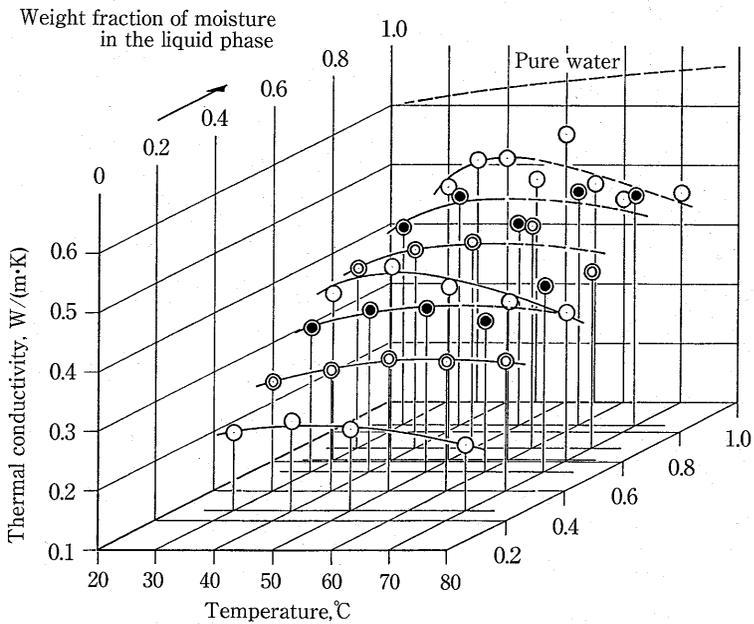


Fig.3-2 Measured thermal conductivity of a series of the model systems
 Solid phase : wheat flour only
 Liquid phase : water/corn oil, definite ratio in each sample

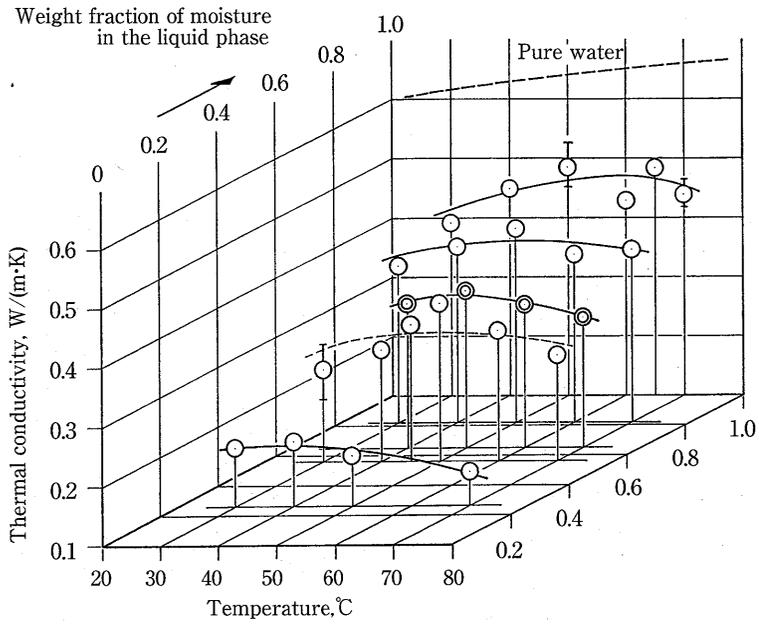


Fig.3-3 Measured thermal conductivity of a series of the model systems
 Solid phase : wheat flour/cocoa powder=1/1 in w/w
 Liquid phase : water/corn oil, definite ratio in each sample
 (Re : 5% Span 80 in the solid phase)

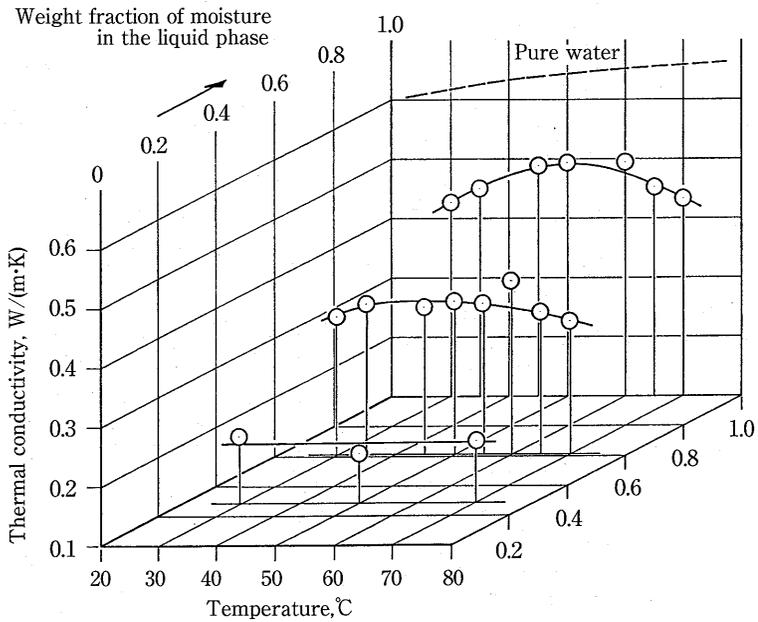


Fig.3-4 Measured thermal conductivity of a series of the model systems
 Solid phase : wheat flour only
 Liquid phase : water/corn oil, definite ratio in each sample
 (Re : 5% Span 80 in the solid phase)

の測定温度 (30℃～80℃) において水分量の増加とともに高くなる。

液体相が水だけの試料 (水分含量48.7%, および41.4%) になると測定値の変動を含めて熱伝導率の値は最大で純水の固有熱伝導率の85%近くになる。これは試料全体の熱伝導における水の役割が大であることを示唆するものである。また試料の水分量が増すと温度変化に対する熱伝導率の変動が目立ってくる。このことは固体相に含まれるでんぶんの膨潤と糊化に対応したものと考えられるが、固体相の分散状態の不均一に原因があるとも考えられるので、食用乳化剤のスパン80を固体相の5%添加して同様に測定を試みた (Fig.3-3, Fig.3-4)。

Fig.4は、この結果から温度30℃、50℃および70℃の状況を特に取り出して示したものである。乳化剤を添加して混合状態を改善しても熱伝導率に対する水分や温度の影響は同じ傾向であることがわかる。

すなわちモデル系のような固体相と液体相とが混合された分散系内部の熱エネルギーの移動は、実測温度範囲においてその連続相である液体相の熱伝導性に支配されることが明らかである。

分散系の有効熱伝導率は、分散相間の巨視的な凝集構造の形成が進むほど高くなるという実験事実が報告されている⁷⁾が、分散状態の良好なエマルションの場合、分散系の誘電現象に適用される次の Bruggeman の式⁸⁾と相似性が成立するとの指摘がある⁹⁾。すなわち、

$$(\lambda_s - \lambda_o) / (\lambda_w - \lambda_o) = (1 - X_o)(\lambda_s / \lambda_w)^{1/3} \quad (4)$$

ここに、 λ_s 、 λ_o および λ_w はエマルション、油相および水相の熱伝導率、 X_o は分散相の体積分率である。本研究においてモデル系の固体相のみの熱伝導率が不明であるが、液相中の

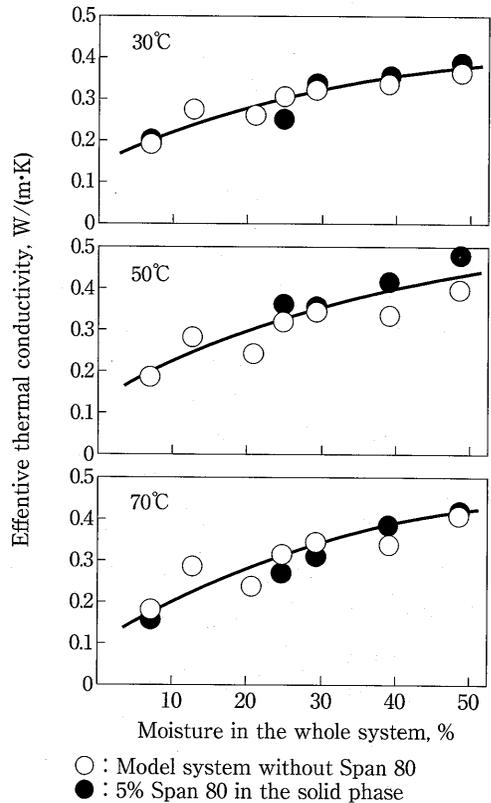


Fig.4 Effect of moisture on the effective thermal conductivity of a series of the model systems

水が重要な役割を果たすことが示唆されたので水とコーン油の各固有熱伝導率を用いて Bruggeman 式の適用を試み、理論式の数値計算値と実測値とを比較したのが Fig.5 である。ここで X_w は液相中の水の重量分率である。

この結果から、水分量が増すと共に (4) 式から予測される値はいずれも実測値よりも高くなり、モデル系を構成する各成分が系内部において複雑な混合状態にあることが示唆された。モデル系の分散相である固体相成分の正確な熱伝導率が不明であるので、(4) 式との整合性については今後の検討課題である。

同様に小麦粉のみのドウについても検討を試みその結果を併記したが、小麦粉のみの試料が比較的適合する値を示したのは興味深い。これは水とコーン油がマクロに混ざり合った

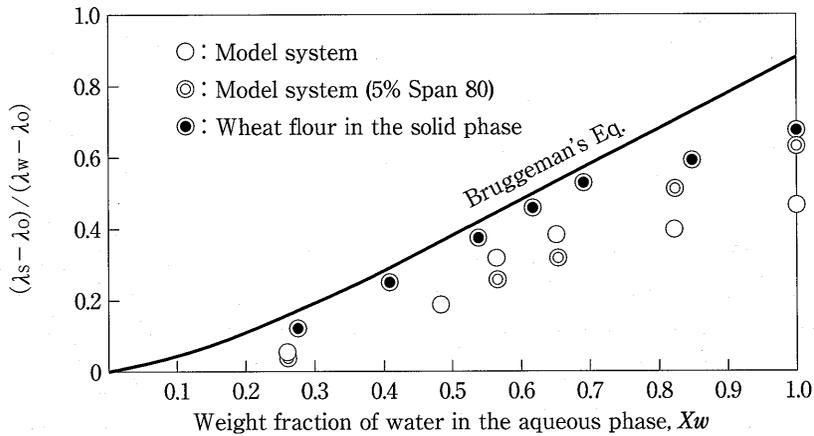


Fig5. calculations for the Bruggeman's type equation (Theoretical and Experimental)

部分に、小麦粉つまり小麦胚乳部の粒子が互いに独立に懸濁している状況が考えられる。水の量が増加するとグルテンのマトリックスが試料内部全体に広がり液体相中の熱流を妨げるため理論値からのズレが目立つのではないかと考えられる。

(3) 有効熱伝導率におよぼす温度の影響

加熱調理の立場からは比較的低い温度範囲(30℃~80℃)における測定結果ではあるが、水分量が増すとともにモデル系内部の熱伝導性に温度の影響が現われるようになる。すなわち、モデル系の液体相が水のみからなる場合(全水分量48.7%)と、コーン油のみからなる場合(全水分量7.1%)とについて、Fig. 6にそれぞれの有効熱伝導率と測定温度との関係を比較した結果を示した。

液体相が水のみからなるモデル系の熱伝導率には、温度60℃付近に浅いピークのある凸な曲線が現われる傾向がある。このことから、モデル系を構成する小麦粉成分中のでんぷんが水とともに膨潤・糊化する現象が、系全体の熱伝導性に影響する状況を考える必要があるであろう。でんぷんのサーモグラフに関する塩坪の研究¹⁰⁾によれば、一般にその糊化開始温度は50℃付近にあり、それ以上の

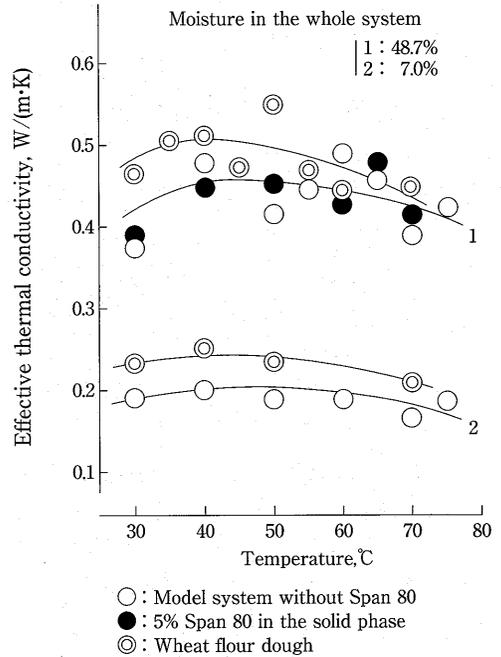


Fig.6 Dependence of the effective thermal conductivity of a series of the model systems upon temperature comparing with that of wheat flour doughs.

各温度に応じた糊化状態が平衡に到達するのに約20minの時間経過が必要である。本測定では各温度の熱流を定常状態として捉えるため、温度設定から測定開始まで30minの時間を設けているので、測定時の試料状態は必ず

れも平衡にあると考えられる。

参考のため、モデル系固体相の全部を小麦粉に置換した小麦粉ドウの有効熱伝導率の温度依存性を Fig. 6 に併せて示したが、50℃付近でピークを持ち上述の傾向が同様に現われていることがわかる。水を加えない系では温度による影響はほとんどみられなかった。したがって、でんぷんの膨潤・糊化にともない試料中の自由水がでんぷん分子に捕捉され、このことが系内部の熱エネルギーの移動に対する抵抗の原因になる状況を推測できるが、熱伝導率の温度依存性の観測から、でんぷんの膨潤・糊化そのものを示差熱分析のように明瞭に検出することは不可能である。

なお、実験の項で述べたように、保形性のあるモデル系を調製するため固体相と混合する液体相の適当量を決めるのに、少量の Span 80 を乳化剤とする水とコーン油とのエマルションを用いた。またこのような乳化剤添加の影響の有無、および固体相の分散状態を均一化する試みとして、固体相に対し Span 80 を 5% 添加して調製した試料の有効熱伝導率を Fig. 4 および Fig. 6 に併せて示した。しかし、同図からも明らかなように、測定誤差の範囲内で Span 80 の効果はモデル系内部の熱エネルギーの移動に関する限り認められない。Span 80 のような界面活性物質の添加効果は、モデル系表面の自由エネルギーの低下に寄与するはずであるから、熱媒体から被加熱食材への熱伝達にかかわる効果として、今後検討すべき課題であろう。

4. 要約

1. 組成を単純化した水分量の異なる加熱用食品素材モデル系を試作・調製し、その定常状態における有効熱伝導率を温度 30℃～80℃の範囲で測定した。

2. 一連モデル系はココア粉末と小麦粉の等量混合物からなる固体相が、任意の混合比

の水とコーン油の液体相中に分散した状態の系であり、一定量の固体相と混合する液体相が適量のとき保形性のある系が生成することを明らかにした。

3. モデル系の有効熱伝導率は 0.19 から $0.43 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ の範囲で水分量の増加とともに増大し、水の存在が熱エネルギーの移動を促進する状況が示唆される。しかし、系全体の熱伝導性に対する Span 80 の添加効果は認められない。

4. 水分量の多いモデル系の有効熱伝導率は、温度上昇にともなって 60℃ 付近に最大値を持つ浅い凸型の温度依存性を示す。これより、温度 50℃ 以上において、モデル系を構成する小麦粉中のでんぷんが膨潤・糊化して自由水を捕捉し、系全体の熱伝導性を低下させる状況を考えることができる。

ここに述べた一連の研究は、(財)すかいらーくフードサイエンス研究所の平成 8 年度学術研究助成金を受け松本幸雄氏と共同して行ったものである。ご配慮を賜った関係各位に対し、深く感謝申し上げます。

文献

- 1) 洪川祥子, 1995, 食品加熱法の理論と実際, 食品加熱の科学 (洪川祥子編) pp.104-138, 朝倉書店, 東京
- 2) 松本幸雄, 1991. 食品の物性とは何か pp.78-92, 弘学出版, 川崎
- 3) Nagao, K., Hatae, K. and Shimada, A. 1997. Occurrence of Ruptures on the Surface of Foods during Frying, J. Texture Studies, 28, 27-46.
- 4) 長尾慶子, 畑江敬子, 島田淳子, 1997. 小麦粉ドウの伝熱特性におよぼす加熱法の影響, 調理科学, 30, 114-121.
- 5) 矢野俊正, 1992. 食品工学の基礎, 食品工学

- 基礎講座 1 (矢野俊正, 桐栄良三編) pp.195-244, 光琳, 東京
- 6) 蒔田 薫, 1966. 輸送定数, 実験化学講座・続 1, 基礎物理量の測定 (日本化学会編) pp.406-428, 丸善, 東京
- 7) 渡辺 啓, 中川鶴太郎, 1963. パラフィン中に金属粉及びカーボンブラックを分散させた系の熱伝導度, 日本化学雑誌, 84, 765-770.
- 8) Hanai, T. 1968. Electrical Properties of Emulsions. In Emulsion Science, (P. Sherman ed.) pp.353-478, Academic Press, London.
- 9) 松本幸雄, 1975. 食品のような多成分混合系の品質管理における問題点, 食品の物性・第 1 集 (松本幸雄, 山野善正編) pp.1-16, 食品資材研究会, 東京
- 10) 塩坪總子, 1983. デンプン糊化の熱的性質, 食品の物性・第 9 集 (山野善正, 松本幸雄編) pp.37-52, 食品資材研究会, 東京