

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 23 年 6 月 30 日 現在

機関番号：32647
研究種目：基盤研究 (C)
研究期間：2008～2010 (平成 20 年度～平成 22 年度)
課題番号：20500690
研究課題名(和文) 冷却面から垂直一次元方向における各種食材内部の冷却速度の測定と解析
研究課題名(英文) Detection and Analysis of the Thermal Conduction in Foodstuffs during Cooling Procedure
研究代表者
長尾 慶子 (NAGAO KEIKO)
東京家政大学・家政学部栄養学科・教授
研究者番号 20217970

研究成果の概要 (和文) : これまでに実施してきた種々の保形性食材を加熱した際に見られる食材内部の熱移動に関する実験研究の結果と対比させながら、今回の研究課題においては、各種の食材冷却時における内部熱移動の詳細を観測し、それを現象論的に記述することを試みた。すなわち、食材を一定温度にまで冷却する操作の開始直後に見られる試料温度の急激な低下は、やがて徐々に収束し続けるようになる。かかる状況は、試料の温度が一定になるまで続く。また、この現象は各食材内部における伝導伝熱により常に出現し、食材の種類や食材成分の相転移、あるいは食材中の水分量や冷却温度範囲等には影響されない。故に、食材の冷却現象は食材に内在する熱エネルギーを緩和させる現象として、時間定数である緩和時間を用いて束一的に取り扱うことができる。

研究成果の概要 (英文) : The thermal conduction induced close to the cooling plane was detected precisely along the one-dimensional axis in a variety of solidified foodstuffs. In all the cases of cooling procedure in this study, the cooling down has commenced in a rapid process in the sample, and the cooling process has then gradually shifted to the slow stage. The cooling has been suspended finally from the procedure. All of the cooling pattern obtained with solidified foods can simply be recognized as the 'relaxation phenomenon' without any noise caused by the phase change of the component in the sample. Such the cooling behavior of foods is quite different from the heating procedure of foodstuffs. Thus, the cooling procedure of foodstuffs can simply be recognized as the relaxation process of thermal energy with the relaxation time.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：家政学、食品化学、調理科学、食品物性論

科研費の分科・細目：1502 A

キーワード：冷却操作、熱移動、無次元温度、食材冷却曲線、緩和時間、熱伝導率、熱拡散率

1. 研究開始までの経緯とその背景

(1) 加熱による食材内部の熱移動

人類史上経験的に構築された調理操作は各地域に固有の文化的所産ではあるが、そこに共通するのは食材を加熱する操作であろう。しかし、加熱による食材内部の熱移動とその結果である食材の状態変化を定量的に理解することは、食材が複雑多様な生体成分で構築されることから非常に困難であった。

本研究代表者と研究協力者は、加熱操作がもたらす食材表面部や内部の状態変化と熱移動との関連性について実験研究を展開し、熱媒体から食材内部への熱の流れは食材成分中熱伝導率の極めて高い水分の量に著しく影響されること、その水が加熱操作中に液相から気相(水蒸気)へ状態を変化させるため食材表面には単純な境界層が存在し得ないことなど調理加熱に固有の問題点を指摘し、これを克服するために「複雑な成分因子」と「加熱法の操作因子」の各テーマを設定し、可及的に単純化した食材モデル系と加熱装置とを用いて食材内部の非定常熱移動現象の詳細を測定した結果、加熱に伴う食材内部の温度上昇を「遅延現象」の概念を用いて記述し得ることを明らかにした。すなわち、加熱時間 $t=0$ 、 $t>0$ および $t=\infty$ における加熱面から試料内部垂直方向 x 軸上の温度を T_0 、 T_t および T_∞ とすると、試料内部の無次元温度 $\phi(t)$ は、遅延現象を意味する次式で表わし得る。

$$(T_t - T_0) / (T_\infty - T_0) = \phi(t) \\ = 1 - \exp[-t / \tau(x)] \quad (1)$$

ここに $\tau(x)$ は遅延現象における時間定数で、各食材の熱移動速度を律する定数である。

(2) 加熱時と冷却時の熱移動の比較

人々の摂食可能な食物の温度は調理温度の高低とは無関係に人間の体温に近い低温

側にあり、その温度付近で食物に対する評価や嗜好が語られる。この事実から、加熱調理後の食物の温度が摂食温度領域にまで低下する状況について、加熱の場合と比較しながら食物内部の熱の散逸に関する移動速度論的な理解が必要であると考え、図1に示すような装置を用いて加熱時と冷却時における食材内部温度の変化を追跡した。すなわち、金属製試料容器の底面から試料内部垂直(x 軸)方向の6箇所(0, 1mm, 3mm, 5mm, 7mm, 10mm)に熱電対を設け、容器底面を加熱あるいは冷却した際の試料内部各位置温度の変化を追跡する装置である。図1には試料容器を冷却器上に固定した場合を示すが、本研究では別に設けた加熱器により試料容器を所定温度にまで予め加熱した後、容器を冷却器上に固定し、試料内各部の温度低下状況を測定した。

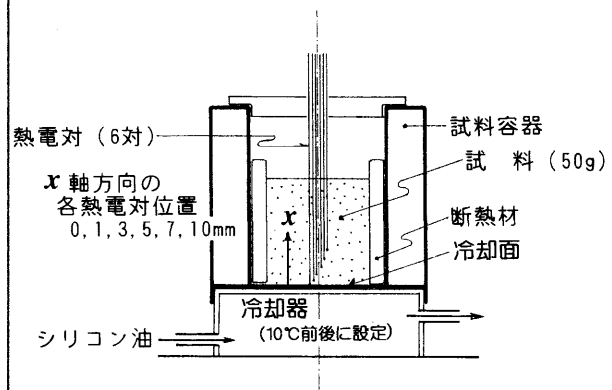


図1 冷却中の食材内部温度変化測定装置

この装置を用い、市販の鶏卵から分離後均質化した卵白部分の加熱～冷却曲線を図2に示す。加熱変性による卵白アルブミンの凝固が系全体に及び、冷却による卵白温度の低下は伝導伝熱により冷却面から試料内各部へ規則的に進行する状況が見られる。すなわちアルブミン熱凝固の際、相変化による多少の乱れが温度上昇曲線に現われるが、冷却時の温度下降曲線は極めて規則的に推移する。

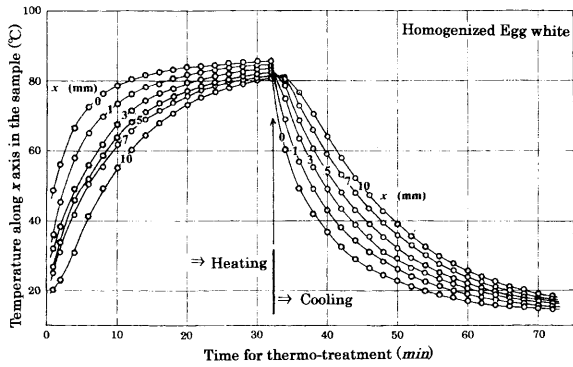


図2 均質化鶏卵白の加熱・冷却曲線

2. 研究の方法(食材の冷却曲線とその解析)

測定の対象とした試料は以下の通り。食材モデル系1および2、希薄なゼラチンゲル、豆腐、こんにゃく、マッシュポテト、にんじん、アボカド、ホイップド生クリーム、およびババロアの10種類。なお、上記の食材モデル系は当該研究代表者らが1998年に開発した研究用試料で、保形性を維持しながら液相中の水分と油分の割合を任意に変化させる系である。ここで食材モデル系1とあるのは液相の全てが水、同2とあるのはそれがコーン油からなる試料を指す。図3は、食材モデル系1の100℃からの冷却曲線である。

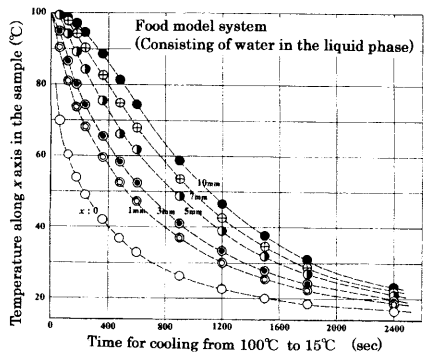


図3 食材モデル系1の冷却曲線

鶏卵白系と同様、食材モデル系においても冷却速度は冷却面から試料内部へ移行する

ほど緩慢になるが、いずれも形状に乱れの無い冷却曲線が観測される。したがって、各試料内部の温度低下曲線は温度エネルギーの緩和現象を意味するものと考え、それを式(1)と同じ記号の次式で表わすことを試みた。

$$dT_0/dt = -T_t/\tau_c(x) \quad (2)$$

ここに τ_c は冷却速度を律する時間定数、すなわち緩和時間である。上式(2)を変形して、

$$dT_0/T_t = -[1/\tau_c(x)] dt \quad (3)$$

上式(3)を積分し、次の温度低下の関係を得る。

$$T_t = T_0 \exp[-t/\tau_c(x)] \quad (4)$$

上式(4)を、式(1)と同様の無次元温度 $\phi_c(t)$ で表わすと、

$$\phi_c(t) = \exp[-t/\tau_c(x)] \quad (5)$$

上式(5)は、冷却面から試料内部x軸方向の位置における温度が冷却開始温度 T_0 の1/eにまで低下するに要する時間(緩和時間)に相当する。但し、eは自然対数の底(2.71828...)。

図3の冷却曲線から実験的に得られる試料内部x軸上各位置の冷却時間tにおける無次元温度 $\phi_c(t)_{obs}$ と、その式(5)からの計算値 $\phi_c(t)_{cal}$ との相関係数rは、図4に示すように極めて高い($r=0.9964$)。同様に、本研究に用いた全試料の冷却曲線についても冷却過程における測定値に対し、式(5)が高い相関係数で対応することが明らかになった。

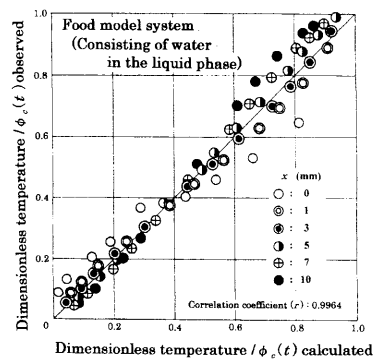


図4 食材モデル系1の冷却中の温度変化 [測定値と式(5)による計算値との相関]

3. 研究結果と考察（緩和現象としての

食材冷却過程とその緩和時間の意味）

冷却による食材温度の低下が伝導伝熱による場合、式(5)に示された熱エネルギーの緩和現象として理解し得る。この機構は、前項に示した豆腐やこんにやくのような非可逆性のゲル、あるいは少なくとも本研究用試料である根菜や果菜類等の食材に対する適用が可能である。また、煮こごりを擬した脆弱な状態のゼラチンゲルの冷却(20℃→10℃)や、多量の泡沫を分散させた不安定な状態のホイップド生クリームやババロアの冷却(18℃→9.5℃)のように狭い低温領域の冷却過程にも、熱エネルギーの緩和現象を適用し得ることが本研究の結果から明らかである。

本紙面には、上述の結果の全てを図示する余裕がないので、各試料について得られた冷却面から試料内部垂直(x軸)方向の距離10mmまでの各位置において式(5)に現われる緩和時間 $\tau_c(x)$ を、表1にまとめた。

表1 本研究に用いた各種食材冷却時における緩和時間 $\tau_c(x)$ の比較

当該研究に用いた各種食材冷却時の緩和時間 $\tau_c(x)$ の比較

食 材 名	冷却面から試料内部垂直(x軸)方向の距離					
	0	1	3	5	7	10 mm
食材モデル系 1	290	620	730	950	1100	1200 sec
同 2	290	600	750	960	1120	1210
ゼラチンゲル	360	520	620	690	760	790
豆腐	330	410	520	640	730	780
こんにやく	220	405	515	630	750	850
マッシュポテト	260	470	600	720	810	900
にんじん	360	480	570	720	840	930
アボカド	280	480	630	750	880	960
ホイップドクリーム	290	550	770	880	1030	1160
ババロア	180	390	550	670	830	890

食材モデル系 1: 液相成分 コーン油、 同 2: 液相成分 純水

調理科学において加熱操作の対極に冷却の問題があると考えられるが、本研究の一端からも予測されるように、その内容は加熱操作の対極にあると言えるほど単純なものではない。例えば、表1に示す食材モデル系1

および同2の各緩和時間の比較において、液相の種類に関係なく殆んど同じ値であることに注目したい。すなわち、液相の種類を超えて固体成分が構築する塑性体の足場構造が、熱エネルギーの散逸速度(試料温度低下速度)と深く関わっていることが示唆されるのである。また、同じ表1に見られるように、各食材の冷却操作における緩和時間には各々の水分量や成分組成よりも保形性を構築する成分の巨視的な構造が関与しており、これが熱エネルギーの散逸速度に影響を与える状況が想定される。その確認のため、さらに研究の展開を図らなければならない。

食材に対する冷却の問題は、実用面では食材の種類や保蔵の目的に合わせて冷却貯蔵、氷温貯蔵、冷凍貯蔵等が行われており、それぞれについて主に工学的立場からの研究・開発が行われている。一方、調理科学分野においては加熱や冷却操作での熱エネルギー散逸の問題に対し、食材の性質や状態との関連において一層理解を深めるための努力が必要であると考えられる。

4. 主な発表論文等

(1) 雑誌論文 4件(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に下線)

1) 水 珠子・長尾慶子: O/W型食用エマルジョン内部の熱移動に及ぼす分散油滴径の影響、日本調理科学会誌41(4)、227-233(2008) 査読有。

2) 水 珠子・長尾慶子: O/W型およびW/O型エマルジョン加熱における内部熱移動の測定、日本食品科学工学会誌、55(5)、215-223(2008) 査読有。

3) Tamako MIZU and Keiko NAGAO: Effect of Baking Powder in Wheat Flour Dough on Its

Thermal Conduction during Heating, *Food Science and Technology Research*, 15 (3), 217-224(2009) 査読有。

4) 水 珠子・長尾慶子：メレンゲの熱伝導におよぼす起泡条件の影響、日本食品工学会誌、57(1)、20-25(2010) 査読有。

(2) 学会発表 4 件 (研究代表者に下線)

1) 水 珠子・長尾慶子：小麦粉ドウ内部の熱移動に及ぼす膨化現象の影響、日本家政学会第60回大会、日本女子大学：2008年5月31日。

2) 水 珠子・長尾慶子：泡立て条件を変えて調製した卵白メレンゲ内部の熱移動速度の測定、日本調理科学会平成 20 年度大会、椛山女学園大学、2008年8月30日。

3) 水 珠子・宮下朋子・長尾慶子：泡立て条件が起泡生クリームの性状と加熱・冷却速度に及ぼす影響、日本家政学会第 61 回大会、武庫川女子大学・西宮市、2009年8月31日。

4) 宮下朋子・渡辺綾子・長尾慶子：スイスメレンゲの性状に及ぼす攪拌時間の影響、日本家政学会第 61 回大会、武庫川女子大学・西宮市、2009年8月31日。

(3) 主要引用文献 11 件(研究代表者に下線)

1) 長尾慶子, 加藤由美子, 畑江敬子, 島田淳子: コロッケ破裂の機構, 家政誌 39, 677-682 (1988).

2) 長尾慶子, 畑江敬子, 島田淳子: コロッケ破裂の機構(第2報), 家政誌 40, 373-377(1989)

3) 長尾慶子, 畑江敬子, 島田淳子: コロッケの破裂に及ぼす加熱前冷却の影響, 家政誌 42, 523-527(1991).

4) Nagao, K., Hatae, K., Shimada, A.: Occurrence of Rupture on the Surface of Foods during Frying, *J. Texture Stud.* 28, 27-46 (1997).

5) 長尾慶子, 松本幸雄: 光学的手法を用いた

食品周りの熱流の可視化による食品加熱中の伝熱機構の解析, 食に関する助成研究調査報告書, すかいらーくフードサイエンス研究所, No. 10, 93-102(1997).

6) Nagao, K., Matsumoto, S.: Preparation of Food Models for Examining Heat Transfer in Cooking under the Control of Moisture. *J. Cookery Sci. Jpn.* 32, 10-17(1999).

7) Nagao, K., Matsumoto, S.: Thermal Conduction along by the One-Dimensional Axis in Foodstuffs during Heating in a Metal Vessel. *J. Home Econ. Jpn.*, 52, 241-249 (2001).

8) Nagao, K., Matsumoto, S.: Detection of the Thermal Conduction Induced Cross by the Heating Plane in Foodstuffs during Different Procedures of Heating. *J. Home Econ. Jpn.*, 54, 623-631(2003).

9) Nagao, K., Matsumoto, S.: Retardation Phenomenon Applied to the Thermal Conduction in Foodstuffs during a Variety of Heating Procedures, *J. Soc. Rheology, Jpn.* 33, 93-100(2005).

10) 宮下朋子, 長尾慶子 : ババロアの物性に及ぼす気泡生クリームの性状とゼラチンゾルの混合時温度の影響, 家政誌 57, 469-475 (2006).

11) 長尾慶子 : 加熱操作がもたらす食材内部の熱移動と状態変化に関する研究, 家政誌 58, 541-551(2007).

(4) 産業財産権その他

特記すべき事項 なし。

以上