

揚げ加熱中の食品表面近傍の油流の伝熱学的解析

— コロケとドーナツの比較 —

長尾 慶子

I. はじめに

食品の加工・調理の多くは、加熱操作をとまなう。その結果、タンパク質の熱変性やデンプンの糊化等、個々の食品成分に質的な変化が生じると同時に、試料全体の膨化、表面部位の亀裂や着色等、食品の外観にも種々の変化が併発する。このような外観の変化は、調理食品の食感要素を左右する重要な問題でもある。

著者は、これまで食品の加熱時に発生する亀裂現象に注目し、揚げ加熱、蒸し加熱、天火加熱等多様な加熱方法に適用可能な亀裂発生条件の理論的予測を試み、これをコロケとドーナツを対象試料として実験し、理論の妥当性を種々の側面から検証してきた^{1)~8)}。この一連の研究において、食品と熱媒体とが互いに接する界面での熱交換現象や食品内部への伝熱機構の詳細を追求することが、食品の加工・調理における亀裂発生の正確な予測と、その完全な制御のために必要であることを痛感した。食品が多くの成分と複雑な組織・構造を有する非平衡系であることから種々の実験的困難をとまなうことが予想されるが、食品と熱媒体との界面における熱交換、および食品内部への伝熱現象の各機構を解明する一つの方法として、光学的手法を用いた新しい伝熱測定法を導入したいと考えた。そこで今回もこれまでの研究試料として用いた、食品表面部位の組織・構造が異なるコロケとドーナツを対象に、揚げ加熱の熱媒体である油の試料表面とその近傍における対流を、

ストロボ発光体を付した高速ビデオカメラで追跡記録し、試料表面における熱交換現象の詳細を試料状態と併せて解析することを試みた。同時に加熱にとまなう試料内の温度変化を追跡し、試料表面における伝熱機構を考察した。この研究は継続中であるが、これまでに得られた知見について報告する。

II. 研究の方法

1) 試料

本研究に用いる対象試料は、表面にあらかじめ外皮組織を付したコロケと、加熱により表面に外皮様組織を形成するドーナツの2種類であり、その組成は一般的なポテトコロケとハードドーナツに対応する。試料としたポテトコロケとドーナツの材料配合を表1に示した。

	コロケ	ドーナツA	ドーナツB
乾燥マッシュポテト	16.7		
水	83.3		
小麦粉		55	50
牛乳		13.1	7.8
砂糖		19.4	18
卵		10.8	12.7
バター		0	10
ベーキングパウダー		1.7	1.5

内容物の水分量はコロケが、約80%、ドーナツが約28%と大きく異なっている。それぞれの調製方法は、既報^{1)~8)}に準じた。コロケの衣の厚さは1mmの薄衣とし、形状はコロケ、ドーナツ共に直径約3cmの球状とした。

2) 伝熱測定

各試料を180℃のコーン油中で3分間揚げ加熱し、直径0.5mmのK熱電対を用いて、試料

表面より垂直方向 1 mm および 3 mm の位置の各内部温度変化を追跡した。

以上の温度測定結果と既知の熱伝導率の値とから、各試料の伝熱パラメーターである熱流束、熱伝達率、ピオ数およびヌッセルト数を計算した。

揚げ加熱容器は透明な耐熱ガラス製角型容

器 (15cm の立方体) であり、その平面外側部にストロボビジョンスコープ (菅原研究所製 SVS-3E) と高感度ビデオカメラを設置し、加熱中の試料表面でのコーン油の流動挙動を追跡記録した。

図 1 に試料加熱部および測定・計測各部配置の概略を示す。

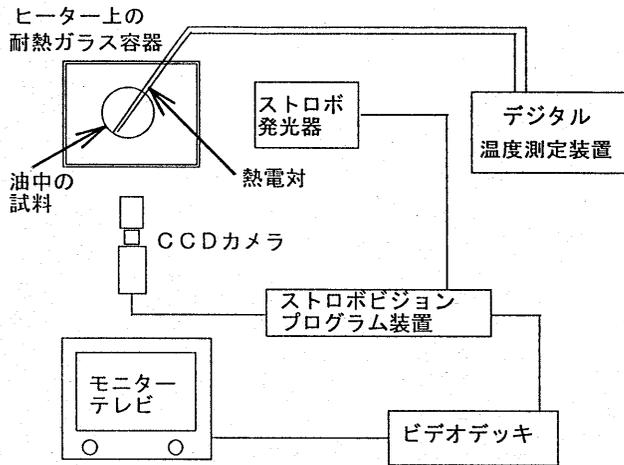


図 1 加熱中の油の流れの解析装置

コーン油の流れを識別するため、そのマーカーとして脱水茶葉の粉末を油中に分散させた。茶葉を炒って 1 ミリ以下の大きさに砕いたものを油中に分散させ、100ms~50ms のストロボ発光速度で、茶葉粉末の流れをガラス容器側面よりカメラ撮影し、それをビデオ画面に再現し、単位時間に移動した茶葉の距離を計測する方法で、試料の表面とその近傍における熱媒体としての油の流束を算出した。

一方、試料の内容物の温度上昇に対応させた熱伝導率として、試料に接している熱源を 50, 75, 100, 125, 150°C に変化させて測定した熱伝導率値⁹⁾を用いた。

3) 伝熱パラメーターの計算

以上の温度計測値と熱伝導率値を用いて、熱流束、熱伝達率、ヌッセルト数などの伝熱係数を求めた。

ある面を通過する熱流束 (単位面積当り、

単位時間当りの熱の通過量) Q (W/m^2) は、試料の熱伝導率 λ_s 、試料表面温度 T_s 、表面より Δx だけ入った位置の温度が T_1 であるとき、次の関係で与えられる。

$$Q = -\lambda_s \frac{T_s - T_1}{\Delta x} \quad (1)$$

しかし、試料表面温度の直接測定は困難であるので、表面から Δx_1 の深さの温度 T_1 (本研究では 1 mm) と、表面から Δx_2 の深さの温度 T_2 (本研究では 3 mm) の測定値より、以下のようにして求めた。

$$Q = -\lambda_s \frac{T_1 - T_2}{\Delta x_1 - \Delta x_2} \quad (2)$$

ちなみに、試料表面温度は、試料内部の実測温度 T_1 および T_2 を用いて、次の関係から推定することができる。

$$T_s \cong T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\Delta x_1 - \Delta x_2} \Delta x_1 = \frac{T_1 \Delta x_2 - T_2 \Delta x_1}{\Delta x_1 - \Delta x_2} \quad (3)$$

試料表面の熱伝導率 α は、単位面積当りの熱流入量すなわち熱流束 Q との次の関係を用いて計算した。

$$Q = \alpha(T_f - T_s) = \lambda_s \frac{T_1 - T_2}{\Delta x_2 - \Delta x_1}$$

$$\therefore \alpha = \lambda_s \frac{T_1 - T_2}{\Delta x_2 - \Delta x_1} \cdot \frac{1}{T_f - T_s} \quad (4)$$

ここで、 T_f は熱媒体(周囲)温度、 T_s は試料表面温度である。油の熱伝導率の値は既知¹⁰⁾の数値を採用した。

ヌッセルト数 Nu およびビオ数 Bi は次式により求めた。

$$Nu = ad / \lambda_f \quad (5)$$

$$Bi = \alpha R / \lambda_s \quad (6)$$

ここで、 α は熱伝達率、 d は試料直径、 R は試料半径、 λ_f は熱媒体(試料をとりまく油、水、空気、蒸気など)の熱伝導率、 λ_s は試料の熱伝導率とする。

III. 結果と考察

1) 内部温度の経時変化

衣の厚さ1mmのコロケと、ドーナツ試料の1mm内側の内部温度の経時変化を図2に示した。3mm内側位置の温度変化も図2と全く同様の傾向であるので、ここでは図示していない。コロケにおいては、加熱初期に内部温度の上昇が急であるが、硬い外皮が形成されると、内部への熱伝達が緩やかになる様子がうかがえる。一方ドーナツではコロケに比べて内部温度の上昇は緩慢であるが、一定の上昇速度で内部温度が上昇する結果が得ら

れる。コロケに比し、外皮部が加熱により自然に形成されること、水分量が低いこと等により、ドーナツに特異的に現れる伝熱現象であろう。

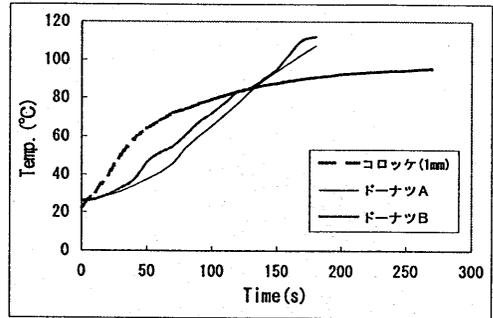


図2 内部温度の経時変化(1mm点)

2) 各伝熱パラメータの算出結果

上述の(1)式を用いて計算した各試料の熱流束 Q を図3に、同じく(4)式を用いて計算した熱伝達率 α を図4にそれぞれ示す。

一般に、試料の単位面積を単位時間に流れる熱、すなわち熱流束 Q は、熱伝導率 λ と温度勾配との積で表されるが、固体と液体との界面における熱流束 Q は、(4)式に示すように液状の熱媒体温度 T_f と固体状試料の表面温度 T_s との差に対する熱伝達率の α の積で表される。

したがって、液体の熱が固体に伝達される効率の良否は、熱伝達率 α の値に支配されるが、図3、4に示す実験結果から明らかなように、今回の実験試料であるコロケへの熱の流入はドーナツのその7倍以上に達する状況がみられる。

しかしながら、単に熱伝達率 α の比較だけでは、同じ形状の試料の場合でもその大きさ、組成、初期温度、および熱媒体の種類とその温度等の影響を受け、伝熱の機構を一般化して相対的に比較するには不都合が多い。このような点からは、各試料の伝熱現象を無次元数を用いて一律に比較すると、上述の試料や熱媒体に起因する加熱条件の多様性を越

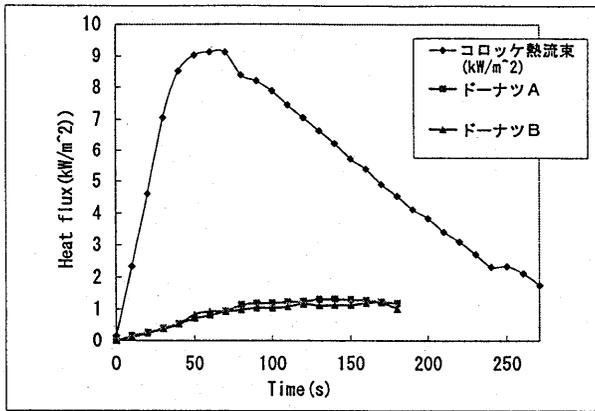


図3 熱流束の比較

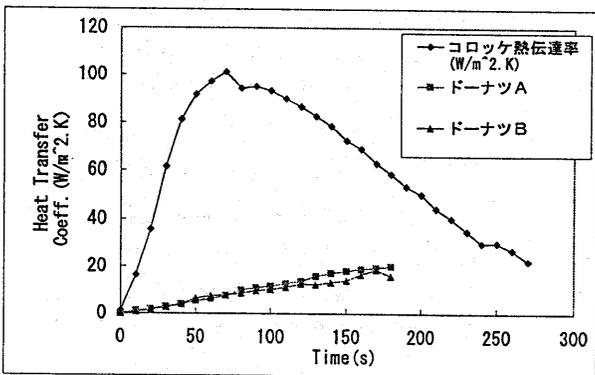


図4 熱伝達率の比較

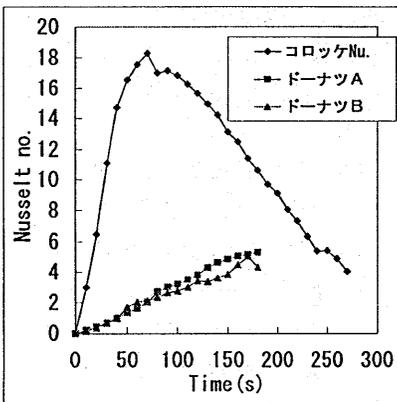


図5 ヌッセルト数の比較

えて伝熱の機構を考察するのに適合すると考えられる。

伝熱現象にかかわる無次元数のうち、(5)、(6)式に示すような簡潔な内容を持ち、その汎用性が高いと思われるヌッセルト数、およびピオ数に注目し、本研究に用いた試料にそれらを適用することを試みた。その一例として、図5にヌッセルト数を計算した結果を示す。すなわち、コロケと二種類のドーナツについて、揚げ加熱におけるそれぞれの熱伝達率を一般化しても、なおコロケへの熱の流入がドーナツのそれよりも高いことを示唆する結果である。

3) 試料表面とその近傍での熱媒体の流れ

揚げ加熱中の試料状態の観測から、熱媒体である油の流れに試料の違いによる明らかな差が認められる。コロケの場合、加熱中にその表面で水と油の交代が激しく起きているので、試料周辺の油の流れに相応の攪乱状態が見られる。ドーナツの周辺では比較的静かな流れが観測される。そこで、図1に示す方法で油流の速さを光学的に追跡することを試みた。図6はその結果の一例であり、各試料について揚げ加熱中の油流速と揚げ時間との関係を図示したものである。

ストロボフラッシュ間隔が50-100msecの範囲でマーカの軌跡から油の流れを計測したところ、ドーナツでは油の流速が3.5cm/s以下であるのに対し、コロケではそれが6.5cm/sであり、ドーナツの2倍の流速が観察された。また加熱初期には油と水の交代現象が激しく起きているので、試料から飛び出す気泡に遮られて鮮明なマーカの流れの映像が追跡できなかったが、実際にはこの計測値を上回る値であろう。測定法の改良により、精

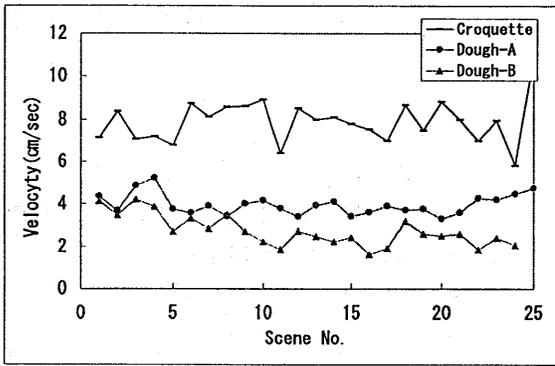


図6 加熱中食品まわりの油の流速

密な解析を実施することが今後の課題でもある。

コロッケとドーナツ周辺の油の流速が異なる原因として、コロッケの場合、その表面に内容物からの水分が供給され、油と水の交代が激しく起こること、衣の素材であるパン粉粒子がコロッケに相対的に広大な表面積を与え、それに伴って油と水の交代が起こる試料と媒体との表面積が増大し、ドーナツに比し伝熱促進が起こりやすい状況を考えることができる。そこで、ドーナツ材料にコロッケと

同じ衣をつけて揚げ実験を行い、油の流速を同様に測定した。図7は得られた結果の一部であり、他の流速と比較して示したものである。

この中でパン粉の粗い衣をつけたものをL、細かいメッシュを通したものをSと記し、衣の荒さによる流速の違いをも検討してみた。興味深いのは、水分量の少ないドーナツでも、バターが多いドーナツCに衣をつけた効果が顕著であった点であり、試料と媒体との界面積の大小が関与することが示唆される結果である。今後、流速の無次元数であるレイノルズ数の算出をすることで、より詳細な界面付近での伝熱機構の解析を試みたい。また図6からも明らかのように、同じドーナツ試料においても、バターの多い試料Bの方が、バターを含まない試料Aよりも加熱中の油の流速が小さいことも興味深い結果であり、界面付近での油の挙動の解析も今後の重要な検討課題である。さらにモデル実験等で、より正確な流速の解析をしたいと考えている。

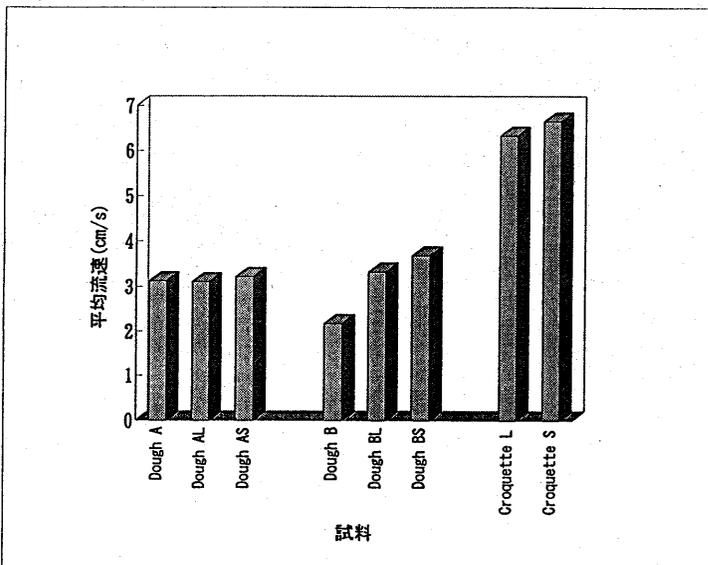


図7 加熱中食品まわりの油の流速

このような試料の水分量ならびに表面部の材質や、表面部の状態、すなわち界面が粗雑面であるか平滑面かによって伝熱量が異なる現象を将来調理中の食品の伝熱量の制御に展開できる可能性を期待したい。

IV. まとめ

揚げ加熱中の食品に対する伝熱現象を、加熱前に衣を付したコロケと加熱中に外皮組織が形成されるドーナツを対象に、新しい計測法を加えて定量的に比較検討した。得られた結果の要点は、以下のようである。

- (1)加熱による試料内部温度の上昇過程を測定し、異種試料に対する熱媒体油の伝熱機構を一般化して比較することを試みた。
- (2)そのため、伝熱学的無次元パラメーターに注目し、その中で汎用性の高いヌッセルト数を計算した結果、コロケについては16-18、ドーナツについては2-5の範囲の値が得られた。
- (3)一方、加熱中の各試料表面とその近傍における熱媒体油の流速をストロボビジョン스코ープで計測する方法を考案し、その速度を比較した結果、ヌッセルト数の高いコロケ表面での流速は常にドーナツ表面のその約2倍であった。
- (4)これら両試料に見られる伝熱状況の特徴について比較検討し、熱媒体と試料とが接する界面で加熱油と試料水分との交代に基づいて起こる伝熱現象が、試料水分量のみならず界面の面積にも比例する状況を考察した。すなわち、試料表面の幾何学的平滑度

が、伝熱機構に関係することが示唆されるのである。

本研究に用いた計測装置の一つであるストロボビジョン스코ープは、平成7年度本学学長調整金により設置されたものです。本研究に対するご理解とご配慮を賜った関係各位に対し、この機会に厚くお礼を申し上げます。

<引用文献>

- 1) 長尾慶子, 加藤由美子, 畑江敬子, 島田淳子: 家政誌, **39**, 677-682 (1988)
- 2) 長尾慶子, 畑江敬子, 島田淳子: 家政誌, **40**, 373-377 (1989)
- 3) 長尾慶子, 畑江敬子, 島田淳子: 家政誌, **42**, 523-527 (1991)
- 4) 長尾慶子, 杉山智美, 畑江敬子, 島田淳子: 家政誌, **42**, 1059-1064 (1991)
- 5) 長尾慶子, 横川知子, 畑江敬子, 島田淳子: 調理科学, **27**, 25-30 (1994)
- 6) Nagao, K., Hatae, K. and Shimada, A.: J. Home Ecn., Jpn., **45**, 211-218 (1994)
- 7) 長尾慶子, 畑江敬子, 島田淳子: 家政誌, **45**, 533-538 (1994)
- 8) 長尾慶子, 畑江敬子, 島田淳子: 家政誌, **47**, 37-47 (1996)
- 9) 長尾慶子: 文教大学女子短期大学部研究紀要, **37**, 61-70 (1993)
- 10) 日本機械学会編: 機械工学便覧A6・熱工学, P173 (1986)