

スチームコンベクションオーブンの加熱特性

山田 晶子, 杉山 智美*, 渋谷 祥子

(横浜国立大学教育人間科学部, *東京ガス(株))

原稿受付平成 13 年 4 月 10 日; 原稿受理平成 14 年 1 月 22 日

Heating Characteristics of Steam Convection Ovens

Akiko YAMADA, Satomi SUGIYAMA* and Shoko SHIBUKAWA

Faculty of Education and Human Sciences, Yokohama National University, Yokohama 240-8501

* Tokyo Gas Co. Ltd., Minato-ku, Tokyo 105-0023

Steam convection ovens utilize two types of heating method: convection heating and steam heating. To ascertain the heating efficiency of this type of oven, the heat transfer coefficient was measured with and without steam. In order to determine the cooking efficiency, the temperature increase and moisture loss of a sample potato ($\phi 50 \times 20$ mm) were measured. The heat transfer coefficient was significantly higher with steam than without steam until the surface temperature of the heated food had reached 100°C . Above this surface temperature, the values with steam and without steam were nearly identical. The rate of increase in the surface temperature of the potato was in proportion to the increase in air temperature and the amount of steam, but the rate of increase in the temperature at the center of the potato did not follow this proportionality. This is believed to have been due to the fact that there was moisture loss from the potato surface at an early stage of heating when the air temperature was above 130°C with steam. On the other hand, when the air temperature was under 130°C with steam, there was no such moisture loss. These results indicate that the steam ratio and air temperature can be adjusted to control the cooking time and moisture content.

(Received April 10, 2001; Accepted in revised form January 22, 2002)

Keywords: steaming 蒸気加熱, heat transfer coefficient 熱伝達率, temperature rise 温度上昇, moisture loss 水分蒸発, steam 蒸気, oven オープン.

1. 緒 言

欧州から導入され, 現在, ホテル等, 洋風料理を大量に調理する分野で広く用いられている加熱機器に, スチームコンベクションオーブンがある. オープン機能にスチーム噴射機能を追加し, 温度コントロールを行えるようにした複合調理器で, 蒸し加熱とオープン加熱という二つの全く異なる加熱法をあわせもっている. 肉料理に多く用いられているが, 肉の水分蒸発が少なく, しっとりとした柔らかな仕上がりになる¹⁾など, 一般的に利点が言われているものの, 実験的なデータはほとんど存在していない.

そこで, 本研究では, スチームコンベクションオーブンの蒸気量による加熱能の変化を測定し, 蒸気量の調節と庫内温度の設定による, 加熱速度と水分変化に対する影響についてジャガイモを試料として

検討を行った.

2. 実験方法

(1) 使用機器

スチームコンベクションオーブン (F 社製 FCCP6G) を使用した. 設定温度 30°C から 130°C までのスチーム機能, 30°C から 300°C までのホットエアー機能, 30°C から 300°C までのコンビスチーミング機能をもつと説明され, 構造の概略は図 1 の通りである. 本研究では, 温度と蒸気量を設定し, コンビスチーミング機能を使用して実験を行った.

蒸気量については, 図 1 に示す通り, 設定温度に達するように加熱されたオープン庫内に, 蒸気発生器で発生させた蒸気 (気体) を噴出し, 送り込む形をとっている. 従って, 送りこまれた蒸気は 100°C より高温

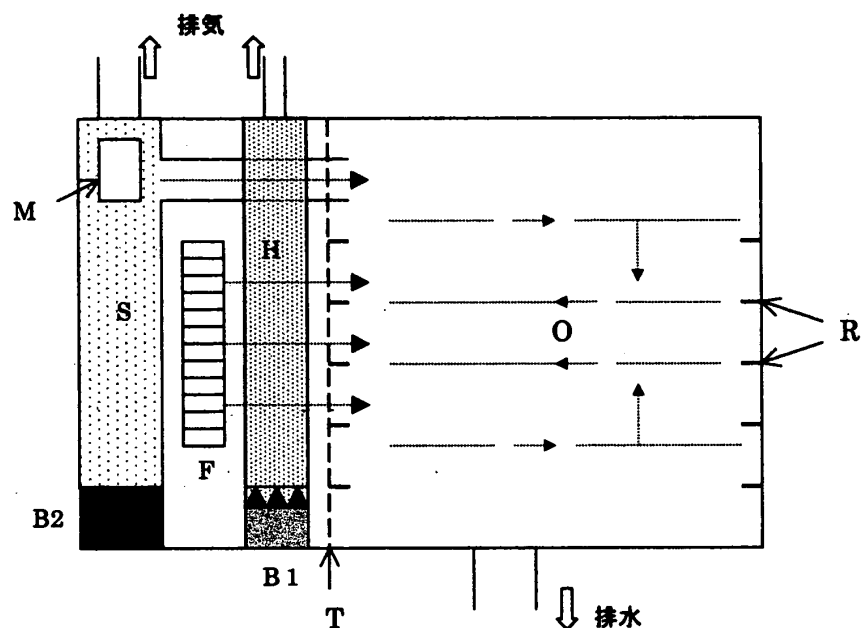


図1. オープン構造図 (略図)

O, 庫内; R, 庫内ラック; T, 風向板; B1, バーナー (ホットエア用); B2, 蒸気発生装置; F, 庫内ファン; S, 蒸気発生器; M, スチーム用モーター; H, 熱鋼管パイプ;▶ 気体の流れ.

になる。送りこむ蒸気量はオープンに付された目盛りによって0%から100%の範囲で表示されるが、これはセンサーにより調節されている。従って、目盛りの表示はオープン庫内にしめる蒸気（気体）の割合を示している。

(2) 機器の加熱能測定

1) 熱伝達率及び放射伝熱の割合

実験で使用する機器の加熱能を調べるため、著者らが従来から行ってきた方法²⁾である、黒色と白色の金属ブロックを用いて受熱量を測定する方法により、機器の熱伝達率と放射伝熱の割合を算出した。機器の設定条件を、庫内温度100, 150, 200℃ (3レベル)、蒸気量0, 50, 100% (3レベル) の9段階とした。

2) 機器の蒸気量及び温度の測定

庫内蒸気量と温度の制御の精度を知るため、蒸気量は庫内の酸素濃度を測定する方法で、また温度については庫内に熱電対を設置して、10秒ごとの空気温度を測定し、平均を算出する方法で、それぞれ実験を行った。

蒸気量制御については、機器の上部に酸素濃度計（横河電機製 OX100）のプロープ（センサー部）が入る穴をあけ、蒸気のもれがないよう庫内に固定して、酸素量を測定、その値を次式 (1) に代入し、蒸気量

割合を算出する方法を用いて測定した。

$$\text{蒸気量割合}(\%) = 100 - (\text{酸素濃度}(\%) / 10 \times 0.21^{-1}) \quad (1)$$

なお蒸気量測定の実験は、東京ガス(株)商品技術開発部で行った。

(3) 食品を用いた実験

1) 試料の調製

試料として、成形したジャガイモを用いて実験を行った。ジャガイモは、試料の切断面を加熱できるように、皮をむき、直径50mmの型で抜き取ったものを、高さ20mmの円柱（約40g）になるように成形した。なお試料は、品質を揃えるため、購入後、一度冷蔵庫に保管し、2日前に室内に出しておいたものを使用した。

2) 加熱条件

本実験で設定した加熱条件は、以下の通りである。

庫内温度：100・130・150・200・250℃ (5レベル)

庫内蒸気量：0・50・100% (3レベル)

庫内温度は、「茹で」の状態から「焼き」の状態までを想定し、幅広く100℃から250℃までの5段階とした。

3) 加熱方法

庫内温度、庫内の蒸気量が設定した温度・蒸気量に

スチームコンベクションオーブンの加熱特性

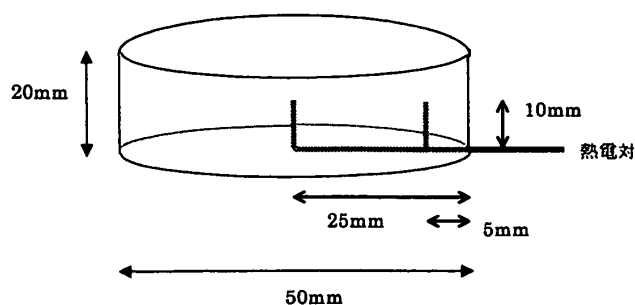


図2. 試料の形状と測定位置

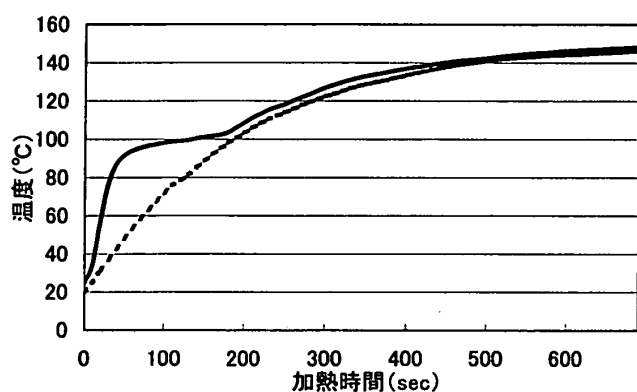


図3. 金属ブロックの温度上昇

蒸気量：—— 100%，---- 0%。

到達した後、試料をグリッドごと入れ、所定の時間加熱を行った。

4) 内部温度の測定

図2に示す通り、試料の側面部5mmと中心部25mmの2カ所に、それぞれ、直径0.3mmのアルメル・クロメル熱電対を差し、試料内部の温度の測定を行った。

5) 水分変化量の測定

それぞれ一定時間加熱したのち、取り出した試料の質量を測り、変化量から水分変化量を算出した。

6) 試料表面部の水分変化量の測定

加熱によって試料表面は収縮するため、加熱後の表面部を一定量採取することが困難である。従って、中心部分をφ40mm×10mmの円筒形に抜き取った残りの部分を表面部とし、加熱前後の表面部の重量変化から水分変化量を算出した。

3. 実験結果及び考察

(1) 機器の加熱能

1) 熱伝達率及び放射伝熱の割合

金属ブロックを用いて、ブロック中心部の温度上昇

表1. 熱伝達率 H ($W/m^2 \cdot K$)

庫内温度	蒸気量				
	0%	50%		100%	
		初期	安定期	初期	安定期
100℃	62	550	—	620	—
150℃	62	240	66	270	66
200℃	62	150	66	150	66

を測定した。庫内温度を150℃に設定したときの温度上昇の様子を図3に示す。結果より、蒸気の有無で異なる温度上昇の様子を示した。蒸気量0%では、図のように内部温度はなだらかに上昇するが、蒸気量50, 100%の場合は、90℃付近まで急激に温度上昇すると、いったんゆるやかな上昇となり、100℃付近まで温度上昇した後は蒸気量0%とほぼ同様の速さで上昇することがわかった。よって、加熱の初期に蒸気の凝縮による伝熱があり、急激な温度上昇をし、表面に凝縮した水分の蒸発が起こった後、気体の対流伝熱のみの加熱によって、安定した上昇をしていくことが明らかとなった。そこで、蒸気量50, 100%において、100℃を境とし、100℃までの立ち上がりを初期、それ以降のなだらかな部分を安定期として、熱伝達率を算出することとした。

前報の方法²⁾に従い、熱伝達率を算出した結果を表1に示す。蒸気量0%では、庫内温度にかかわらず、ほぼ一定の値となったが、蒸気量50, 100%の加熱初期においては、非常に高い値を示した。また蒸気量を多くするほど高い値を示したが、庫内温度が高くなるにつれ、蒸気量による差は小さくなった。一方、安定期の値は、蒸気量、温度にかかわらず一定となった。蒸気存在下では、加熱初期において被加熱物の表面温度は100℃以下であるため、被加熱物の表面で蒸気が凝縮する際の潜熱により、温度上昇は速くなり、熱伝達率も高くなったと考えられる。また、被加熱物の表面温度が100℃以上になると、凝縮の影響はなくなるため、蒸気のない0%同様、気体の対流伝熱のみの加熱になると考えられる。

また、機器の伝熱における放射の割合を前報の方法²⁾同様に算出した結果を表2に示す。伊與田ら³⁾によると、蒸気存在下では放射伝熱による影響が大きいことが示されているが、本実験では、極めて低い値を示した。従って、本実験で用いる機器においては、放射による影響はほとんどないと考えられる。

表 2. 放射伝熱の割合 (%)

庫内温度	蒸気量		
	0%	50%	100%
100℃	4.7	5.9	8.8
150℃	1.8	3.4	8.4
200℃	3.6	11.3	4.6

表 4. 庫内温度実測値 (℃)

表示温度	蒸気量		
	0%	50%	100%
100℃	100.6±0.7	100.4±0.8	100.4±0.9
150℃	149.7±1.4	150.1±1.3	150.2±1.4
200℃	198.1±1.9	198.8±1.7	198.4±1.5

表 3. 庫内蒸気量実測値 (%)

設定温度 (℃)	表示蒸気量 (%)	実測値 (%)
100	30	44.0
	60	66.0
	90	78.9
170	0	0.0
	30	29.5
	60	67.6
	90	81.4
250	0	0.0
	30	50.2
	60	73.5
	90	87.1

2) 機器の蒸気量及び温度の測定

庫内蒸気量については表 3 に、庫内温度については表 4 にそれぞれ結果を示す。庫内温度に関しては、いずれの条件においても設定温度と実測値との誤差が 1 % に満たず、かなり正確に制御されていることがわかった。しかし、蒸気量については、設定蒸気量を上げると蒸気量は高くなるが、データのふれもあり、あまり細かな調整ができないことが明らかとなったため、本研究での蒸気量の設定は、0%, 50%, 100% の 3 段階とすることとした。

(2) 食品を用いた実験

次に、実際の食品の加熱特性を検討するため、試料としてジャガイモを用いて、試料内部の温度上昇速度、試料の水分変化量について実験を行った。

1) 試料内部の温度上昇速度

庫内温度と蒸気量の関係が温度上昇に与える影響をみるため、試料内部の温度上昇速度の測定を行った。でんぷん糊化等の相変化による影響を避けるため、試料内部温度が 10℃ 前後から 50℃ に達するまでの時間を測定し、温度上昇速度を算出した。試料表面近傍は表面からの水分の蒸発や焦げとも関連してくると考え、

試料側面から 5 mm の周辺部、また食品中心部の 25 mm の位置に、熱電対を設置し、試料の温度変化の測定を行った。結果を図 4 に示す。

結果より、庫内温度 100℃ から 150℃ までの各条件においては、周辺部、中心部ともに、蒸気が存在する方が、温度上昇速度は大きくなることが示され、また、庫内温度を上げた方がより温度上昇が速くなることがわかった。

一方、庫内温度が 150℃ より高くなると、周辺部は 150℃ までと同様、蒸気量が多く、庫内温度が高い方が、温度上昇速度は大きくなることが示されたが、中心部は蒸気存在下では、庫内温度を高くすると逆に温度上昇は遅くなるという結果になった。

食品の内部の温度上昇について考えると、庫内温度が高くなるほど表面部に伝わる熱量は多くなるが、一方表面からの水分蒸発は大きくなるため、熱は表面の温度上昇、水分蒸発の潜熱に費やされ、それと同時に内部への伝熱が起こる。そのため、庫内温度が高い場合、試料中心部の温度上昇は遅くなると考えられる。

周辺部 5 mm の位置では、蒸気量を多くすると庫内温度の影響が小さくなった。また庫内温度が低いときは蒸気量の影響を大きく受けるが、庫内温度が高くなると影響を強く受けなくなることが示された。この結果は、加熱初期の熱伝達率は、庫内温度が高くなると蒸気量による影響を受けにくく、値が小さくなるという結果とも一致する。

一方、中心部では、蒸気量 50, 100% ではある温度までは庫内温度を上げた方が速くなるが、さらに高い温度では遅くなることがわかった。よって、蒸気量を多く、庫内温度を高くした方が速くなるとは限らず、食品の種類や形状により、試料における適度な蒸気量、温度設定を選ぶ必要があることが示された。

2) 試料の水分変化量

食品からの水分蒸発をみるため、試料全体の水分変化量を測定した。

図 5 は試料の水分変化量の経時変化を示す。結果が

スチームコンベクションオーブンの加熱特性

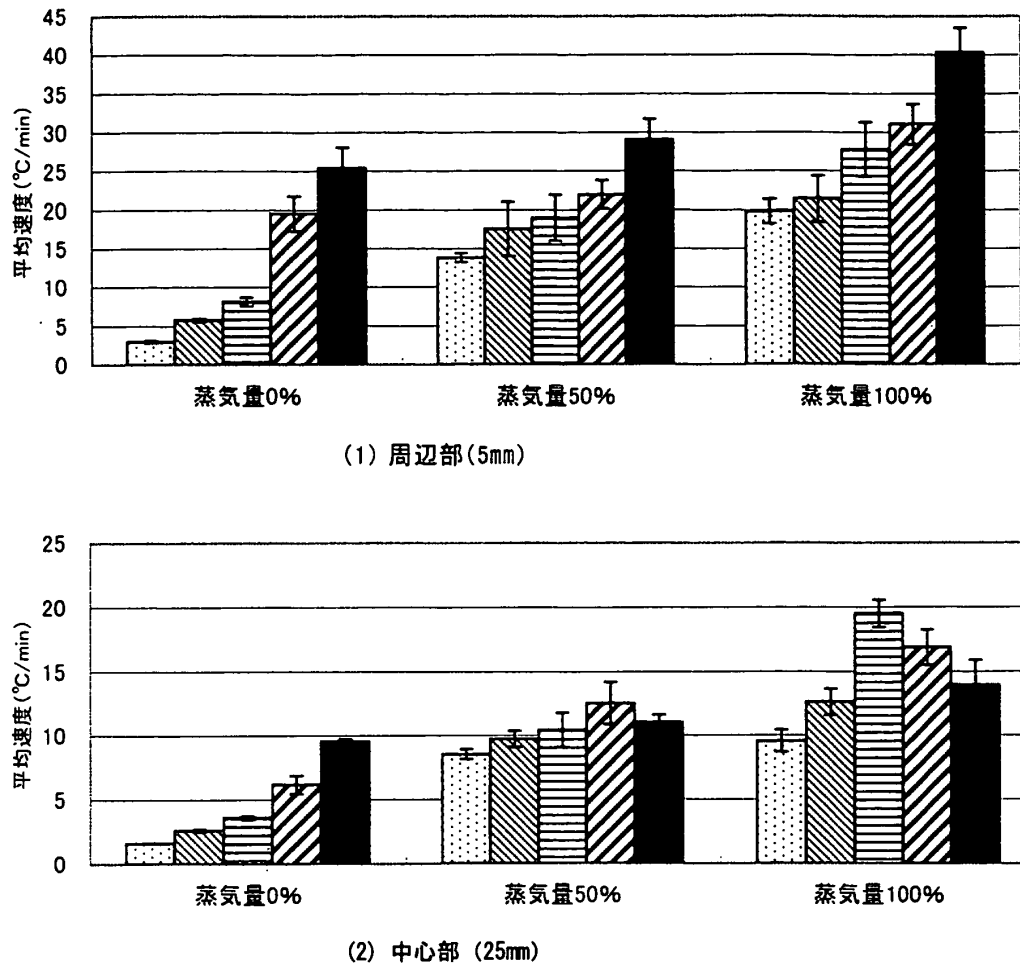


図4. 温度上昇速度

試料：ジャガイモ $\phi 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 庫内温度：□ 100°C, ▨ 130°C, ▤ 150°C, ▩ 200°C, ■ 250°C.

ら、蒸気量0%では、いずれの設定温度においても加熱時間5分ですでに負の値となり、水分が蒸発していることが示された。一方蒸気量50, 100%では、庫内温度100°Cの場合、いったん重量が増えてから、水分蒸発することが示され、庫内温度の低いときには、まず蒸気が食品に付着し、その水分が蒸発してから、食品が乾燥しはじめることがわかった。伊與田ら³⁾は、水を被加熱物、過熱水蒸気を熱媒体とし加熱を行ったときの過程を①凝縮過程、②蒸発復元過程（①で増加した水分が蒸発）、③蒸発乾燥過程（被加熱物から水分が蒸発）の3過程にわけているが、ジャガイモを被加熱物にした場合も同様の過程を経ていると考えられる。庫内温度を高くし、250°Cにした場合には水分は常に蒸発することが示され、このような高温では、蒸気が存在しても、水分付着の時間が非常に短いので、すぐに乾燥しはじめるのではないかと考えられる。ま

た、同じ庫内温度では、蒸気量を多くすることにより、水分蒸発がおさえられることが示された。

3) 試料表面部の水分変化量

食品の水分付着と乾燥の関係をより明らかにし、食品が乾燥し始める時間と蒸気量、庫内温度の関係を明らかにするため、ジャガイモの試料表面部の水分変化量を測定した。

前実験で得られた乾燥が起こりはじめるまでの時間から30秒刻みに加熱時間を設定し、測定を行った。加熱前後の試料は、表面5mmとその他に切りわけ、その重量変化から水分変化量を算出した。

算出結果を図6に示す。設定庫内温度100・130・150°C、蒸気量50%・100%のときの乾燥開始時間を結んだものである。乾燥開始時間は①凝縮過程と②蒸発復元過程の合計にあたる。

結果のグラフより、円筒形で、表面積70.65 cm²の

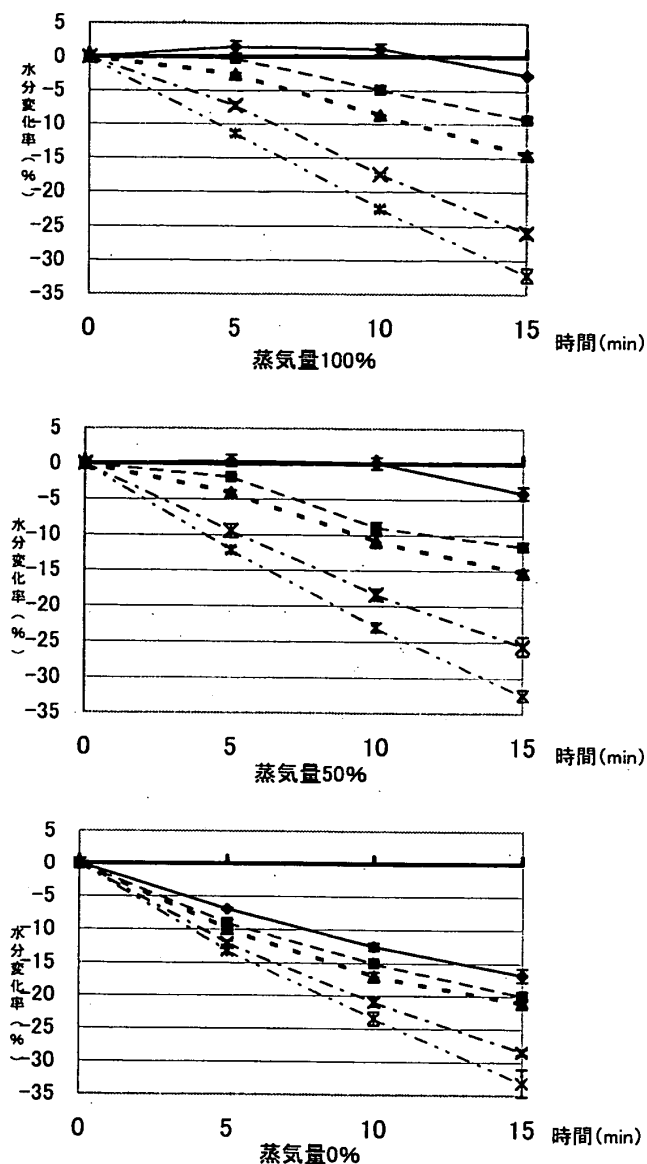


図5. 水分の経時変化

試料：ジャガイモ $\phi 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 庫内温度：—◆— 100℃, -■- 130℃, --▲-- 150℃, --×-- 200℃, --*-- 250℃.

ジャガイモの場合、蒸気量 100%・庫内温度 100℃では乾燥開始時間は 12 分となり、それ以前の加熱時間であれば水分が付着し、それ以上加熱すると乾燥しはじめることを示している。ここから蒸気量を同じにした場合、設定温度を上げていくと、乾燥の起こりはじめる時間は短くなることが示された。また、蒸気量 50% と 100% とを比較した場合、50% の方が短時間で乾燥しはじめる。さらに、庫内温度が 150℃ になると、蒸気量の差はなくなり、20 数秒で乾燥しはじめることが示され、庫内温度をそれ以上の温度に上げた場合、乾燥開始時間はさらに短くなることがわかった。従っ

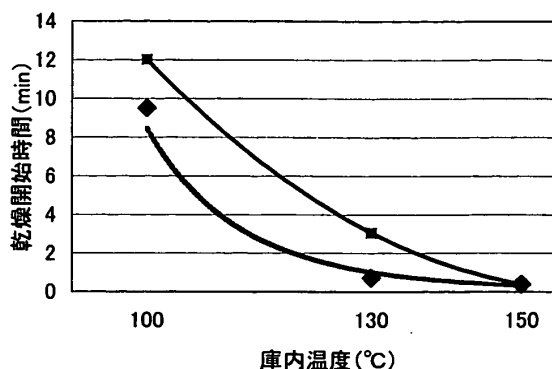


図6. 試料表面の乾燥開始時間

試料：ジャガイモ (円筒形 $\phi 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ・表面積 70.65 cm^2), ◆ 蒸気量 50%, ■ 蒸気量 100%.

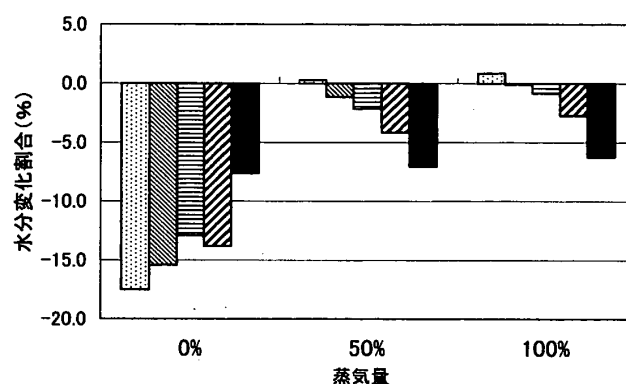


図7. 中心温度 50℃における水分変化割合

試料：ジャガイモ $\phi 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 庫内温度：□ 100℃, ▨ 130℃, ▤ 150℃, ▩ 200℃, ■ 250℃.

て、庫内温度が低いときは、蒸気量が多いほうが乾燥開始時間を長くできること、その一方で蒸気量 100% でも、庫内温度が高くなると凝縮時間は非常に短くなり、乾燥過程に入ってしまうことが明らかとなった。

食品の中心温度が一定に達するまでの加熱時間は加熱条件によって異なり、その時点での乾燥状態は条件によって異なる。中心温度と乾燥状態の関係を知らため、試料中心部が 50℃ に達した時点での水分変化量について比較した。結果を図 7 に示す。ここでは、蒸気量 0% において、庫内温度が高い方が水分減少の割合が小さくなった。一方、蒸気が存在する場合は、逆に庫内温度が低いほど水分減少の割合が小さくなることを示された。蒸気存在と庫内温度の調節によって中心部が一定温度になったときの蒸発量を調節できることが明らかとなった。

主に大量調理の分野で用いられているスチームコンベクションオープンであるが、今後さらに一般的な調理機器として使われる可能性があるため研究の必要が

スチームコンベクションオーブンの加熱特性

あると思われる。

4. 要 約

スチームコンベクションオーブンの加熱能の測定から、熱伝達率は蒸気の下では、品温 100℃までの加熱初期段階は高い値を示し、安定期では庫内温度、蒸気量の影響にかかわらずほぼ一定の値となることが明らかとなった。

ジャガイモを用いた実験から、試料の周辺部の温度上昇速度については、庫内温度が高く、蒸気量が多いほど速くなり、また蒸気量が多くなると庫内温度による影響を受けにくくなることがわかった。試料中心部に関しては、庫内温度が高く、蒸気量が多いほど速くなるとは限らないことが示された。

一方、試料の水分変化については、蒸気の下では、庫内温度 150℃までは水分が明らかに増える段階があるが、それ以上になるとすぐに水分蒸発しだすことが示された。また蒸気量の多い方が試料からの水分

蒸発を抑え、庫内温度が高くなると蒸気量による影響は小さくなることが明らかとなった。

以上の結果より、蒸気量や庫内温度を調節することによって、温度上昇速度や水分蒸発量を調整できることが示された。

なお、本報の概略は、日本調理科学会平成 12 年度大会で発表した。

引 用 文 献

- 1) 平山一政：食品のスチーム加熱とその装置—スチームングとスチームコンベクション—, ジャパンフードサイエンス, **37** (1), 33-38 (1998)
- 2) 洪川祥子：調理における加熱の伝熱的解析および調理成績に関する研究, 家政誌, **49**, 949-958 (1998)
- 3) 伊與田浩志, 西村伸也, 野呂奉弘：過熱水蒸気乾燥における凝縮から蒸発への反転過程, 日本機械学会論文集 (B 編), **63** (612), 2764-2770 (1997)