食パンの物性変化にみる多機能型オーブンレンジの機能別加熱特性

肥後温子^{1*}, 寺本あい², 五十川友子², 引地由佳里²

¹ 文教大学健康栄養学部

² 関東学院大学人間環境学部

Effects of Heating with Multifunctional Microwave Ovens on the Textural Properties of White Bread

Atsuko Higo^{1*}, Ai Teramoto², Tomoko Isokawa² and Yukari Hikichi²

¹ Faculty of Health and Nutrition, Bunkyo University, 1100 Namegaya, Chigasaki-shi, Kanagawa 253-8550

² College of Human and Environmental Studies, Kanto Gakuin University,
1-50-1, Mutsuura-higashi, Kanazawa, Yokohama 236-8503

White bread was heated in convection microwave ovens with multiple functions, including oven (Ov), grill (Gr), steam (Sm), microwave (Mw), superheated steam grill (SSG), and superheated steam oven (SSO) functions. The texture, water content, and browning of the heated breads were investigated. 1) Bread heated with superheated steam softened quickly, and the texture was both soft and crispy. The texture of bread heated with Sm at 180°C was soft. 2) The speed of browning using SSG was 2.5 times faster than with Gr, and that using SSO was 2 times faster than with Ov. 3) Based on a water distribution model system, the textural characteristics of SSG and SSO samples are caused by the rapid speed of drying and surface browning, and the high internal moisture content. 4) The hardening caused by heating using Sm was slow, but the texture of long-heated bread was the same as that using Mw.

(Received Oct. 14, 2010 ; Accepted May 20, 2011)

Keywords : multifunctional microwave oven, steam, superheated steam, textural properties, white bread

キーワード : 多機能オーブンレンジ, 水蒸気, 過熱水蒸気, 物性, 食パン

最近市販されている多機能型オーブンレンジには、電子レンジ、オーブン、グリル機能に加えてスチーム機能を備えた機種が多い。スチーム機能はオーブン、グリル、マイクロ波加熱と組み合わせて使用されており、「しっとり仕上げたい時」、「やわらかく温めたい時」、「火の通りを良くしたい時」、「ふくらみを良くしたい時」に有効であるというメーカーの説明がある¹⁾。

スチーム機能付きオーブンレンジは1978年（昭和53年）に多機能化を目的に発売されたが²⁾、最近「おいしさ」や「ヘルシーさ」のメリットをうたっている場合が多い³⁾。2004年（平成16年）に家庭用オーブンに過熱水蒸気発生機能が搭載された機種が上市され、その一方で業務用のスチームコンベクションオーブンの人気が高まったこと、また健康を志向する新しい価値観LOHAS（Lifestyles of Health and Sustainability）が生まれたこと等が、水蒸気を利用してオーブンに付加価値をつける動きを

加速したように思われる。過熱水蒸気（水蒸気を過熱した熱放射線性ガス）は、オーブンやグリルメニューを「香ばしく仕上げたい時」、「サクッとさせたい時」に有効であり、脱油・減油、減塩、抗酸化効果もあると説明されている⁴⁾⁵⁾。

多機能化・付加価値化が進む中で、オーブンレンジ機能の多くが有効活用されているとは言い難い状況にある。また、多機能オーブンレンジを用い、水蒸気、過熱水蒸気が調理食材に及ぼす効果を調べた報告は多くない⁶⁾⁷⁾。そこで、乾湿両加熱時の物性変化を敏感にとらえることができる食材として食パンを用い、多機能型オーブンレンジのオーブン、グリル、マイクロ波、スチームおよび過熱水蒸気の各機能別加熱特性を明らかにする試験を行った。

実 験 方 法

1. 多機能型オーブンレンジ

2006～2008年に入手した家庭用の多機能型オーブンレンジ4機種（A～D機種）の機能、仕様、スチームの発生機構と用途をTable 1に示す。

(1) 試験機種の機能

¹ 〒253-8550 神奈川県茅ヶ崎市行谷1100

² 〒236-8503 横浜市金沢区六浦東1-50-1

* 連絡先 (Corresponding author), higo@shonan.bunkyo.ac.jp

Table 1 Product functions and specifications of the multifunctional microwave ovens

Function・Specification		A (Mitsubishi RO-DL2)	B (National NE-A300S)	C (Sharp RE-WD30)	D (Sharp Healsio AX-1000)
Inside parts	Hot Air	Convection	Convection	Convection	Convection
	Square Plate	Heatproof ceramics	Iron enamel ware	Iron enamel ware	Iron enamel ware
	Plate Rack	Double	Triple	Double	Triple
Oven	Power Consumption	1 450 W	1 380 W	1 400 W	1 360 W
	Maximum Temperature	270°C	250°C	300°C	250°C
Grill	Power Consumption	1 450 W	1 380 W	1 400 W	1 360 W
Microwave	Power Consumption	1 430 W	1 450 W	1 460 W	1 460 W
	Output Power	1 000, 600, 500, 200, 100 W	700, 500, 300, 200, 100 W	1 000, 600, 500, 200 W	1 000, 600, 500, 200 W
Steam with Oven or Grill	Mechanism				
	Water Content	50 ml	700 ml	30~50 ml	* Superheated 950 ml
	Utensil	Ceramic plate	Tank	Steam-tank	Tank
	Pre-steam	○	○	○	○
	Application	Grilled fish, Chicken (Yakitori), Hamburg and etc.	Better rising Chou and Cake, Dryness Prevention for Salt-Grilled Fish, Grilled Chicken	Chawan Mushi, Custard, Hamburg, Sponge Cake, Chou, Bread	Meat, Cake, Bread, Chou and etc.
Steam with Microwave	Mechanism	Auto limited	300 W Microwave	500 W Microwave	—
	Application	—	under steam operation Sake Steamed Clams, Rice Cake (Ichigo Daifuku)	under steam operation Sake-Steamed Dish and etc.	—

* Mechanism of Producing Superheated Steam

(1) Heated by Steam Producing Unit (100°C steam), (2) Heated by Superheated Steam Producing Unit (highest temperature at nozzle is 340°C), (3) The temperature is regulated by turning steam on and off

A～D機種はヒータによるオーブン（略称 Ov），グリル（Gr）機能，マイクロ波（Mw）発振機能およびスチーム（Sm）発生機能をもち，A と C 機種はオーブンレンジ，B 機種はスチームオーブンレンジ，過熱水蒸気発生機能（過熱水蒸気のオーブン機能：略称 SSO，過熱水蒸気のグリル機能：SSG）が付いた D 機種はウォーターオーブンの名称を使っている。

(2) 試験機種の仕様

Table 1 に示すように，A～D 機種のオーブン，グリル使用時の最高消費電力は 1 360～1 450 W，マイクロ波の最高消費電力は 1 430～1 460 W，オーブンの最高温度は 250～300°C，マイクロ波の最高出力は 700～1 000 W であった。

スチームの発生機構として，A，C 機種は角皿またはタンクに水 30～50 ml を入れ，予湿用の熱源としてマイクロ波を使用していた（加熱調理時にはヒータのみでスチームを発生している）。B，D 機種はタンクに水約 700 ml，約 950 ml を入れてヒータ加熱する方式を用いていた。

スチームを使う手動操作は，以下の項目に限られることがわかった。

- a) オーブンとスチームとの併用加熱：A～D の全機種
- b) マイクロ波とスチームとの併用加熱（Sm+Mw 300 W，Sm+Mw 500 W）：B，C 機種のみ
- c) 蒸し加熱（Sm 100°C 以下）：D 機種のみ
- d) グリルとスチームの併用加熱：B 機種のみ

オーブンレンジを補佐しイメージアップするためにスチームを導入しているが，簡易仕様がが多く，蒸し加熱用機器に比べて水蒸気の発生量が少ないためと考えられる（Table 1）。

(3) スチーム，過熱水蒸気機能の用途と使用目的

A～C 機種ではスポンジケーキ，シュー皮，魚の焼き物，焼きとり，ハンバーグ，コロッケなどのオーブン・グリルメニューにスチームを併用しており，D 機種ではオーブン，グリルメニューの多くに過熱水蒸気のオーブン機能（SSO），過熱水蒸気のグリル機能（SSG）を使用していた。

スチームを併用する目的は，ケーキ，シュー皮，パンのふくらみを良くし，焼き魚，ハンバーグ，茶碗蒸しをしっとり仕上げるためであり，過熱水蒸気の使用目的にも柔らかくジューシーに仕上がるという説明があった^{1)3)～5)}。

2. 試料

(1) 食パン

市販の無添加食パンの耳を落として 9 等分し、縦横幅 3.0~3.4 cm とした角切り食パンを機能別加熱試験に用いた。市販食パン（神戸屋製）：8 枚切り/1 斤（350~410 g）、厚さ 11.9±0.4 mm、水分 43.8±2.0%（以上は測定値）、原材料：小麦粉、果糖ブドウ糖液糖、植物油脂、発酵調味液、パン酵母、脱脂粉乳、食塩（以上は表示）、100 g 中の成分：炭水化物 43 g、タンパク質 7.6 g、脂質 5.1 g（以上は表示値より計算）。

(2) 餃子の皮

大判餃子の皮 10 枚（1/2 袋）を層状に重ね、水分分布、焦げ色分布の試験に用いた。餃子の皮（モランボン製）：直径 101±1 mm、10 枚の厚さ 10.1±0.2 mm、10 枚の重さ 49.8±1.2 g、水分 31.6±1.2%（以上は測定値）、原材料：小麦粉、澱粉、食塩、食用植物油脂、還元水あめ、酒精（以上は表示）、100 g 中の成分：炭水化物 60 g、タンパク質 7.5 g、脂質 0.1 g（以上は表示値より計算）。

3. 加熱試験

機能別の加熱試験は次の 7 項目とし、最長加熱時間は焦げてもろくなる限界時間とした。なお、オーブン、スチーム、過熱水蒸気の試験には、多用される 180℃ を設定温度とした。

1) オーブン加熱（Ov180℃）：オーブン皿のほぼ全面に角切り食パン約 40 枚を重ねないように並べ、180℃ に予熱した庫内に入れて最長 50 分間加熱した。棚板は一段（原則として下段）とした（全機種）。

2) スチーム加熱（Sm 180℃）：定法どおり 180℃ に予湿し、オーブンとスチームとの併用加熱を行った。棚板は一段（原則として下段）とし、オーブンと同様に試料を並べて最長 50 分間加熱した（A、B、C 機種）。

3) グリル加熱：棚板は原則として上段とし、オーブンと同様に試料を並べて最長 20 分間加熱した（A、B、C 機種）。

4) 過熱水蒸気のオーブン加熱（SSO 180℃）：過熱水蒸気で 180℃ に予湿し、ローストモード、棚板は一段（下段）で最長 50 分間加熱した（D 機種）。

5) 過熱水蒸気のグリル加熱（SSG）：過熱水蒸気で予湿し、ウォーターグリルモード、棚板は中段で最長 20 分間加熱した（D 機種）。

6) マイクロ波加熱（Mw 1000, 700, 500, 300, 200 W）：試験 1 回につき角切り食パン約 100 g を加熱の所定位置にリング状に並べ、ラップをかけて Mw 1000 W 2 分間（A、C、D 機種）、700 W 2 分間（B 機種）、500 W 3 分間（A、B、C、D 機種）、300 W 6 分間（B 機種）、200 W 8 分間加熱した（A、C 機種）。

7) マイクロ波とスチームとの併用加熱（Sm+Mw 500 W, Sm+Mw 300 W）：Sm+Mw 500 W は定法どおり Mw

1000 W で 1 分間予湿した後、所定位置に試料を並べて 6 分間加熱した（C 機種）。Sm+Mw 300 W はスチームヒーターで予湿し、定位置に並べて 10 分間加熱した（B 機種）。

以上の条件において、加熱途中で角切り食パン 6 枚を取り出した直後に二重にラップ包装して 5 分以上放冷し、角切りパン中央部の硬さを測定する実験を 2 回繰り返した。

4. テクスチャー測定

レオロメーター・マックス（アイテクノ製）を用い、先端部 12×2 mm のくさび型プランジャー、圧縮速度 200 mm/min、チャート速度 600 mm/min、クリアランス 2 mm の条件で各加熱段階において角切り食パン 1 枚につき 1 点、計 6 点以上測定し、破断曲線から最大応力（テクスチャー曲線の最大ピーク値）、初期弾性率（圧縮開始時の立ち上がり傾斜）、発生ピーク数（凸数）を求めた⁸⁾。加熱前後の試料の厚さはノギスにより測定した。

5. 水分量と水分分布

135℃、3 時間乾燥法により食パンおよび餃子の皮モデルの加熱前の水分量を測定し、食パンの場合には各加熱段階で取り出した角切り食パン 6 枚の重量変化より水分量を計算した。餃子の皮モデルの場合には、大判餃子の皮 10 枚を重ねて糸で固定したモデル系を 20 分加熱後（Mw 500 W は 2.5 分加熱後）、10 枚重ねた皮を 1 枚ずつはがす実験を繰り返し、各層の皮重量 3~6 枚分の平均値より水分量と水分分布を求めた。

6. 焦げ色と焦げ色分布

色差計（東京電色 TC8600）を用い、各加熱段階で取り出した食パン上部表面 6 ヶ所の色差 ΔE を測定し⁹⁾、常法に従って $\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$ を求めた。餃子の皮モデルの場合には各機能別に一定時間加熱し、10 枚重ねた皮の各層の上部 6 ヶ所の ΔE 値（皮の縁から 1, 3, 5 cm 内部）を測定し、焦げ色分布を求めた。

7. 食パン内部の水分分布の推定

大判餃子の皮 10 枚を重ねて糸で固定したモデル系を使い、各機能別に加熱後の各層の皮の水分残存量と上部表面の焦げ色を求めたところ、食パンより求めた水分残存量と上部表面の焦げ色との間に相関がみられた。そこで、餃子の皮モデルと食パンの水分分布にも共通点があると考え、食パン表面（Mw は内部）が $\Delta E50$ に到達した時点の食パン内部の水分分布を推定し、各機能別に求めた食パンのテクスチャーと水分分布との関係を考察した。

実験結果および考察

1. 食パンの機能別破断特性

多機能オーブンレンジ 4 機種を使い、1) オーブン加熱（Ov 180℃）、2) 過熱水蒸気のオーブン加熱（SSO 180℃）、3) スチーム加熱（Sm 180℃）、4) グリル加熱、5) 過熱水蒸気のグリル加熱（SSG）、6) マイクロ波加熱（Mw 1000, 700, 500, 300, 200 W）、7) マイクロ波とスチームとの併

Fig. 1 Effects of heating with multifunctional microwave ovens on the texture of white bread

Fig. 2 The textural properties of bread heated using the oven, grill, steam, and superheated steam functions

—■—, A ; —▲—, B ; —◆—, C ; —●—, D. Superheated Steam : - -□-, SSO ; - -◇-, SSG.

用加熱 (Sm+Mw 500 W, Sm+Mw 300 W) の7項目について機能別の加熱試験を行った。

機能別の加熱特性を1機種での測定で判断するのは危険なので、Ov 180°C 4機種、Sm 180°C 3機種、Gr 3機種、Mw

3~4機種で試験した。加熱用食材は食パンとし、各機能別に加熱したパンのテクスチャーを比べた。食パンは多孔質で吸湿も乾燥もしやすいため、乾湿両加熱時のしっとり感、パリ感を捉えやすい。マイクロ波加熱時の硬化現象が

Table 2 The textural properties of bread heated with a multifunction microwave

	Initial elastic modulus 10 ³ N/m ²														
Heating Time	0	1	2	3	5	10	15	20	30	50 min					
Oven 180°C (mean value of 4 types)	1.20	—	—	—	7.94	14.8	—	18.2	18.5	17.1	**	**	**		
Steam 180°C (mean value of 3 types)	1.20	—	—	—	2.42	12.4	—	12.6	11.6	12.0				**	**
Superheated Steam SSO 180°C	1.20	—	—	—	2.46	15.3	—	17.9	18.0	18.4				**	**
Grill (mean value of 3 types)	1.20	—	—	1.12	2.26	15.5	25.2	21.5	**	**	**	**	**		
Superheated Steam SSG	1.20	—	—	7.26	13.6	16.9	13.9	11.7							
Microwave 1 000 W (mean value of 3 types)	1.20	12.9	26.4												
Microwave 500 W (mean value of 4 types)	1.20	1.57	21.2	32.9							**	**	**		
Steam + Microwave 500 W	1.20	2.30	8.24	11.8	27.0										
Microwave 300 W	1.20	0.61	1.33	24.7	24.5						**	**	**		
Steam + Microwave 300 W	1.20	2.22	3.98	7.12	13.0	29.6									

Mean of 3~4 types of ovens.

S.D. of initial elastic modulus : 0.1~2.5 (Oven, Steam), 0.2~4.3 (Grill), 0.2~6.6 (Microwave)

* : $P < 0.05$ ** : $P < 0.01$

パンでよく捉えられた経験もあり¹⁰⁾, 加熱法の違いが物性に現れやすいと推察した.

機能別加熱試験の全様を, Fig. 1 に示す. Ov, Sm, Gr, SSO, SSG の典型的・平均的なテクスチャー曲線を Fig. 1 左に, Mw および Sm + Mw の典型的・平均的なテクスチャー曲線を Fig. 1 右に示し, 次の 1)~7), Fig. 2 で各機種のテクスチャー変化について説明する. 各機能別のテクスチャーの平均値および標準偏差は Table 2 を参照された.

1) オープン加熱による破断特性

180°C オープン 4 機種による食パンの最大応力, 初期弾性率, ピーク数の破断特性値の変化を Fig. 2 左に示す.

食パンの最大応力 (加熱前 $9.05 \pm 0.88 \times 10^5 \text{ N/m}^2$) は, 加熱 5 分後にわずかに低下し, 20~30 分後まで上昇, 40~50 分後には低下する傾向がみられた. B, C 機種に比べて A, D 機種の変化が大きく, A 機種の変化が遅かった. 初期弾性率 (加熱前 $1.20 \pm 0.25 \times 10^3 \text{ N/m}^2$) は, 加熱 5 分後に 7.9, 20~30 分後に 18.2~18.5 と上昇し, 40 分後に 17.0 を示した (いずれも 4 機種の平均値).

多孔質な組織をもつパンは凹凸の多い破断曲線を示すので, パリ感の指標としてピーク数を数えた. ピーク数 (加熱前 1.0) は 20 分付近まで上昇し, その後漸増して 30~40

分後に 5.9 (4 機種の平均値) の最大値を示した. 以上から, Ov 加熱によりパンが乾燥して硬くなり, クラッカー性を増し, 最後に焦げてもろくなることがわかる (Fig. 1 左上, Table. 2 参照).

2) 過熱水蒸気のオープン加熱特性

過熱水蒸気の破断特性 (SSO 180°C, D 機種) を, Ov 180°C と同じ Fig. 2 左に示した. SSO 180°C の最大応力値は, 加熱 5 分後に $3.3 (\times 10^5 \text{ N/m}^2)$ と大きく低下したが, 10 分に急増しその後漸増した. 初期弾性率は 5 分後に $2.4 (\times 10^3 \text{ N/m}^2)$, 10 分後には 15.3 と急増し, その後 17.8 まで漸増した. Ov の平均値と比べると, SSO は 5 分後の最大応力, 初期弾性率とも有意に低く ($p < 0.01$), 20~30 分後の最大応力も Ov より低値を示したことになる ($p < 0.05$).

SSO 180°C のピーク数は 5 分後にすでに 4.4 まで上昇し, 30 分後に最大 6.8 となった. Ov 180°C では 5~30 分後にピーク数の平均値が 3.4~5.9 なので, 過熱水蒸気の投与によって明らかに軟らかいがクラッカー性のある状態が出現したことになる. 長く SSO 加熱すると軟らかさは失われるが, Ov よりパリ感が長続きする傾向もみられた (Table 2 参照).

3) オープン加熱へのスチームの併用効果

指定の容器に水を入れて予湿し, A~C3 機種を用いて

オープン加熱へのスチームの併用効果 (Sm 180℃) を調べた。Sm 180℃ による破断特性値の変化を Fig. 2 中央に示し、比較のため同図中に SSO180℃ の変化を示した。

Sm 180℃ と Ov 180℃ との比較：Sm 180℃ の最大応力は加熱 5 分後に低下し、10～50 分後に最大 $18.8 (\times 10^5 \text{ N/m}^2)$ まで上昇したが、Ov 180℃ の平均値と比べると有意に低かった ($p < 0.01$)。初期弾性率も 5～10 分後に急増したが、その後低下して 20～50 分後に 3 機種の平均値は $10.8 \sim 12.6 (\times 10^3 \text{ N/m}^2)$ となり、Ov 180℃ より有意に低かった ($p < 0.01$) (Table 2 参照)。ピーク数は加熱 5 分後には 2.0 (3 機種の平均値) と有意に少なかったが ($p < 0.01$)、20～50 分後には Ov 180℃ に近い値を示した。

Sm 180℃ と SSO 180℃ との比較：Sm 180℃ は SSO 180℃ と比べて、加熱 5 分後の最大応力は有意に高く ($p < 0.01$)、ピーク数は有意に低い値を示した ($p < 0.01$)。20～50 分後の初期弾性率も有意に低く ($p < 0.01$)、ピーク数は SSO 180℃ より明らかに少ないので、Sm 180℃ は SSO 180℃ より軟らかいがパリ感は劣るといえる (Table 2 参照)。

4) グリル加熱による破断特性

グリル加熱 (Gr) による A～C 機種の食パンの破断特性値の変化を Fig. 2 右、Table 2 に示した。最大応力値 ($\times 10^5 \text{ N/m}^2$) は 3～5 分後に 4.25 まで低下し、その後 15 分まで上昇して最大 34.0 (C 機種) となった。初期弾性率 ($\times 10^3 \text{ N/m}^2$) は 5 分後まで変化がなかったが、15 分後に 25.2 (3 機種の平均値) の最大値を示した。ピーク数は 12～20 分後には 3 機種とも Ov に近い値を示した。

Gr 加熱では加熱初期に最大応力・初期弾性率・ピーク数とも Sm 180℃ に近い低値を示し、15 分後には最大応力・初期弾性率とも Ov より高値を示したところから、加熱 3～5 分後までは軟らかく、10 分後には軟らかさにパリ感が加わり、15 分後には硬くパリ感のある物性に变化したと言える。タイミングよく取り出せばグリル加熱 (A 機種では 300℃ と明記) では軟らかさとパリ感が共存する状態が得られることになる。

5) 過熱水蒸気のグリル加熱効果

過熱水蒸気のグリル加熱 (SSG, D 機種) による破断特性値の変化を、Fig. 2 右の Gr と同画面に示した。SSG の最大応力は 3 分後に $6.2 (\times 10^5 \text{ N/m}^2)$ と低下したが、5、10 分後には 13.5、20.5 と急増した。初期弾性率、ピーク数は 3 分後に急増している (Gr と比べて $p < 0.01$ で有意)。SSG の破断曲線や特性値の変化は SSO と似ているが、単位時間当たりの物性変化のスピードが約 2 倍速い (Fig. 1 左下、Table 2 参照)。

過熱水蒸気を用いた SSG では最大応力・初期弾性率・ピーク数の変化がきわめて速く、急速にパリパリ感が付与されたことが裏付けられた。なお、SSG は加熱初期の物性変化が速い割にその後の変化が Gr よりゆるやかなので、

Fig. 3 The textural properties of bread heated using the microwave functions and the combination of steam and microwave

1000 W : —■—, A ; —◆—, C ; —●—, D. 700 W : - -▲- -, B. 500 W : - -■- -, A ; - -▲- -, B ; - -◆- -, C ; - -●- -, D.

軟らかさとパリ感のある物性を得やすいといえる。

6) マイクロ波加熱による破断特性

Mw 1000 W 3 機種、700 W 1 機種、500 W 4 機種、300 W 1 機種、200 W 1 機種のマイクロ波加熱による最大応力、初期弾性率の変化を Fig. 3、Table 2 に示した。

マイクロ波出力 700～1000 W (合わせて 4 機種) の最大応力は、20～40 秒後に $2.05 (\times 10^5 \text{ N/m}^2)$ まで低下し、その後急上昇し 80 秒後には最大 67.5 (700 W の B 機種) となった。初期弾性率 ($\times 10^3 \text{ N/m}^2$) も、20～40 秒後に 0.93～1.40 (4 機種の平均値) と低下したが、その後急上昇し 100 秒後には平均 33.2 を示し、Ov 180℃ の約 2 倍硬い状態となった。ピーク数 (図表は省略) は 40 秒後まで 1.0 であったが、100～120 秒後には平均値では最大の 5.1～5.2 を示した。

出力 500 W の 4 機種による食パンの最大応力は、30～60 秒後に低下したが、その後急上昇し、1.5～2.0 分後には最大 61.0 を示し、最大応力、初期弾性率とも Ov180℃ の約 2 倍となった。最大応力が急上昇し、次いで初期弾性率、

ピーク数が上昇して急速に硬化するマイクロ波特有の物性変化がみられたといえる¹⁰⁾ (Fig. 1 右, Table 2 参照).

7) スチームとマイクロ波の併用加熱効果

予湿後, C 機種を用いてスチームと Mw 500 W の併用加熱 (Sm+Mw 500 W), B 機種を用いてスチームと Mw 300 W の併用加熱 (Sm+Mw 300 W) を行った. 初期弾性率の変化を Table 2 に示す.

Sm+Mw 500 W で加熱した食パンの最大応力は, 加熱 1 分後に $5.25 (\times 10^5 \text{ N/m}^2)$ と低下し, 3 分後に 34.2, 6 分後に 56.0 と急上昇した (図表省略). 初期弾性率も同様に, 3~6 分後に急上昇している. Sm+Mw 300 W の最大応力は加熱 2 分後まで 4.86 と低く, 5~8 分後に 29.5, 55.5 と急上昇した. 初期弾性率も同様に, 加熱 2 分後まで低く, 5~8 分後に急上昇した.

Sm+Mw 500 W の変化を Mw 500~1 000 W 加熱と比較すると, 硬化のスピードは 1/3 以下に低下している. スチームを併用すると硬化までの時間を遅らせることができるので実用的に問題が少なくなるが, 硬化現象を根本から防ぐことはできないことがわかった. Sm+Mw 300 W についても同様のことがいえる (Fig. 1 右参照).

2. 加熱による水分減少

破断特性を調べた後の食パンをそのつど包装し, 水分量を測定した. Fig. 4 は, 各機能別に示した水分量の変化 (試験機種の平均値) である.

加熱前の水分量 $43.8 \pm 2.0 (\%)$ は, 5~10 分加熱後に Gr 35.2~21.2 > Sm 180°C 31.2~17.8 > SSO 180°C 25.7~16.7 > Ov 180°C 24.7~13.8 > SSG 16.5~7.6 となった (Mw を除く). 以上の結果から, 加熱初期に Gr が Ov 180°C, SSG より軟らかく, SSO 180°C, Sm 180°C が Ov 180°C より軟らかい理由として水分残存量が多いことが考えられる.

一方, Mw 1 000 W 加熱では 2 分後に, 500 W では 3 分後に, 300 W では 6 分後に水分が 7% 以下に低下し, スチームを併用した Sm+Mw 500 W は 6 分後に, Sm+Mw 300 W は 9 分後に水分が 7% 以下に低下した (Mw 300 W, Sm+Mw 300 W については図表省略). スチームを併用すると水分残存量が増え, 硬化時間を遅らせる効果があることが確認できた.

3. 加熱による焦げ色変化

破断特性を調べた後の食パンを使い, 焦げ色 (ΔE 値) を測定した. 各機能ごとの焦げ色変化は Fig. 6 下を参照されたい. 食パン表面の ΔE の平均値は (Mw を除く), 加熱前に 25.2 (± 2.7) であったが, 10~15 分加熱後に SSG 65~77 > SSO 48~53, Gr 44~64 > Sm 36~45 > Ov 31~38 となり, SSG, Gr では 10~15 分加熱後, SSO, Sm, Ov では 30 分加熱後に $\Delta E 60$ 以上 (黒焦げ) となることがわかった.

Mw の場合には内部が先に焦げ, パンの気孔を通して測定された ΔE 値であるが, その平均値は 5~8 分加熱後に Mw 500 W 58~69 > Sm+Mw 500 W 33~55, Mw 300 W

Fig. 4 The decrease in the total water content of bread heated with each function

—■—, Mw 1 000 W (mean); —◆—, Mw 500 W (mean);
····◇····, Sm+Mw 500 W; —■—, Oven 180°C (mean);
····●····, Steam 180°C (mean); ···□····, SSO 180°C;
—▲—, Grill (mean); ···△····, SSG.

Mean of 3~4 types of oven used for test, S.D. of water contents: 0.2~3.4.

35~56 > Sm+Mw 300 W 27~46 となった.

以上の結果, 1) ヒータ熱源に近い SSG, Gr は SSO, Sm, Ov に比べて焦げ色変化が速い, 2) 過熱水蒸気を用いた SSG, SSO 180°C の焦げ色変化が Gr, Ov 180°C より速く, スチームを併用した Sm 180°C の焦げ色変化が Ov 180°C よりやや速い, 3) スチームを併用した Sm+Mw 500 W, Sm+Mw 300 W の焦げ色変化が Mw 500 W, Mw 300 W よりかなり遅いことが示された.

4. 物性変化にみる機能別加熱特性と水蒸気・過熱水蒸気の効果

人は加熱の仕上がり状態を表面の焦げ色によって判別する場合が多いので, 食パン表面が一定の焦げ色 ($\Delta E 50$) に到達した時点の水分量を比較した (Mw を除く). $\Delta E 50$ 到達時間とその時点の水分量および破断特性値を, Table 3 に示す (Fig. 2, Fig. 6 参照).

1) $\Delta E 50$ に到達するための加熱時間は, SSG < SSO 180°C < Gr < Sm 180°C < Ov 180°C の順に長くなり, SSG は焦げ速度が Gr の 2 倍強, SSO 180°C は Ov 180°C の約 2 倍速く, Sm 180°C は焦げ速度が Ov 180°C の 1.2 倍強速い結果となった. 一方, 2) $\Delta E 50$ 到達時のパンの平均水分量 (%) は, SSG 17 > Gr 16 > SSO 180°C 15 > Sm 180°C 10 > Ov 180°C 5 の順に少ない結果となった. これは, 短時間で焦げた試料ほど総水分量が多いことを示す結果である.

SSG, SSO, Gr は Ov に比べて水分が多く残存しているにもかかわらず焦げやすいという矛盾したような事実を検証するため, 重ねた餃子の皮モデルを使って焦げ色分布と水分分布を調べる実験を追加した.

5. 加熱後の水分分布と焦げ色分布

大判餃子の皮モデルを使い, 表面から内部まで 10 層の

Table 3 The time, water content and texture properties reached at $\Delta E50$

Function	reached time min	Water content %	Maximum stress 10^5 N/m^2	Initial elastic modulus 10^3 N/m^2
Oven 180°C (mean value of 4 types)	20.2	5	23±5	19±3
Steam 180°C (mean value of 3 types)	16.5	10	16±4	12±2
Superheated Steam SSO 180°C	11.0	15	17±3	17±2
Grill (mean value of 3 types)	11.2	16	20±5	16±4
Superheated Steam SSG	4.9	17	13±2	14±3
Microwave 500 W [§] (mean value of 4 types)	2.7	6	39±5	32±6
Steam+Microwave 500 W [§]	6.4	6	58±6	28±5

Texture properties (maximum stress, Initial elastic modulus) were mean±S.D

[§] ΔE were inner value

* : $P < 0.05$ ** : $P < 0.01$

Fig. 5 The distribution of the water content and ΔE on heating with the model systems—estimated water distribution within the bread

upper : ΔE distribution of dumpling skin $\cdots \blacksquare \cdots$
 lower : Water distribution of dumpling skin $\blacksquare$ $\rightarrow$ Water content and distribution of bread at $\Delta E50$ (estimation) $-\cdots-$

焦げ色と水分量を測定した。上部表面の焦げ色と焦げ色分布を Fig. 5 上に、水分布と平均水分量を Fig. 5 下に示す。

20 分加熱後の餃子の皮の焦げ色分布 $\cdots \blacksquare \cdots$ (加熱前 24.6 ± 1.8) のうち上部表面の ΔE の平均値は $\text{SSG} > \text{Gr} > \text{SSO } 180^\circ\text{C} > \text{Sm } 180^\circ\text{C} > \text{Ov } 180^\circ\text{C}$ となり (Fig. 5 上参照), 20 分加熱後の餃子の皮の平均水分量 (% , --- で表示) は $\text{SSG } 7.5 < \text{Ov } 180^\circ\text{C } 14 < \text{SSO } 180^\circ\text{C } 17, \text{ Sm } 180^\circ\text{C } 17 < \text{Gr } 20$ の順に多いことがわかった (Fig. 5 下, 水分布 $\blacksquare$ — $\blacksquare$ —中の数字は上部表面と中心部の水分量)。

餃子の皮と食パンとでは水分量も厚みや密度も異なるが、餃子の皮 20 分加熱後の平均水分量は、食パン約 10 分加熱後の水分量に相当する (Fig. 4 参照)。また、餃子の皮 20 分加熱後の上部表面の焦げ色の濃さは、食パン 10~15 分加熱後の焦げ色に近いことがわかった (Fig. 6 参照)。そこで、餃子の皮と似た水分布がパン組織中に存在すると仮定してパンの水分布を推定した。餃子の皮の水分布を $\Delta E50$ 到達時の食パンの平均水分量 (前述) まで並行移動したのが、 $\Delta E50$ 到達時の食パンの水分布 (推定) $-\cdots-$ で

Fig. 6 Comparison at the $\Delta E50$ of typical load-time curves of bread heated with each function and the effects of steam and superheated steam

—◆—, Mw500 W (mean); ◇, Sm+Mw500 W; —■—, Oven180°C (mean); —●—, Steam180°C (mean); —□—, SSO 180°C; —▲—, Grill (mean); —△—, SSG.

Mean of multi-function oven used for test, S.D. of ΔE : 2.2~4.6.

ある (Fig. 5 下に併示, Table 3 参照).

1) SSG, Gr は表層部で乾燥と焦げが進むが内層の水分残存量が多いため, 圧縮時に歪みながら破碎する. SSG で外はパリパリ, 中は軟らかいテクスチャーが現れたのはそのためであろう. 2) 加熱時間が長い Ov, Sm, SSO (いずれも 180°C) は内層部まで乾燥が進むが, 水分量が SSO > Sm > Ov の順に多いため SSO, Sm で Ov より軟らかいテクスチャーが現れたと考えられる.

6. 機能別加熱特性と水蒸気・過熱水蒸気的作用

Ov, Sm, SSO, Gr, SSG, および Mw, Sm+Mw の 7 種の機能別に $\Delta E50$ 到達時の食パンの破碎曲線, 平均水分量と水分分布 (推定) をまとめると, Fig. 6 のようになる (Fig. 1, Table 3 参照). 食パンの加熱物性を比べた結果, 過熱水蒸気 (SSG と SSO) は焦げ・パリ感・軟らかさを併せ持つ食感を得るのに有効であり, 水蒸気の投与 (Sm 180°C) も軟らかさ・焦げ色を得るのに有効である. 水分残存率と水分分布の違いがそれら物性の差異を生みだしていることがわかった.

過熱水蒸気で焼成すると昇温が速くて焼き色が濃く, またスポンジケーキの表層部が硬く・もろくなったという報告がある⁷⁾¹¹⁾. 過熱水蒸気は凝縮伝熱 (539 cal/g) の寄与が大きいため加熱速度が速く, 庫内温度 230°C では熱風方式の約 8 倍の熱量で食品をおおう¹²⁾. 加熱初期には試料に

凝縮水が付着して軟化し, その後内部の水分を保持したまま表面が乾燥してパリッとした仕上がりとなるという^{5)13)~15)}. 本実験結果もそれを裏づけるものであった.

スチームの場合にもオープンとの差は認められたが, 水蒸気の発生量が少なく, またオープン加熱時の余った消費電力をスチームに振り分けているためか, 途中で水蒸気量が変わる場合があった. Sm 180°C では, 水蒸気のもつ潜熱 (395 cal/g) とオープン加熱時の複合伝熱 (高温空気による対流伝熱, 庫壁からの放射伝熱, 鉄板からの伝導伝熱) が合算され, 加熱初期には試料に凝縮水が付着して軟化し, 焦げ速度も若干速まったと推察される¹⁶⁾.

過熱水蒸気のテクスチャー改善効果は明らかになったが, 蒸気発生のために多量のエネルギーが必要である¹⁵⁾. おいしくヘルシーなものを欲しがるニーズによって付加価値製品は生まれるが, 簡便性や省エネ性との両立は困難な場合もあるので, 機能別の消費電力量, 用途を含めオープンレンジの使い分けについて再度考えてみたい.

要 約

多機能オープンレンジのオープン (Ov), グリル (Gr), スチーム (Sm), マイクロ波 (Mw) 加熱機能および過熱水蒸気のオープン加熱機能 (SSO), 過熱水蒸気のグリル加熱機能 (SSG), スチームとマイクロ波の併用加熱機能 (Sm

+Mw)の違いを、食パンのテクスチャー、水分、焦げ色を指標として比べた。

(1) 過熱水蒸気を使用したSSG, SSOでは加熱初期に急速に軟化し、軟らかさとパリ感を兼ね備えた破断特性が得られた。オープンとスチームを併用したSm 180℃では軟化効果のみが認められた。

(2) 過熱水蒸気のグリル機能(SSG)では焦げ速度がGrの約2.5倍、過熱水蒸気のオープン機能(SSO)では焦げ速度がOvの約2倍速く、Sm 180℃では焦げ速度がOvの約1.2倍速かった。

(3) 一定の焦げ色に到達した時間はSSG<SSO<Gr<Sm 180℃<Ovの順となり、短時間で焦げた試料ほど残存水分量が多くなった。

(4) モデル系を使って水分分布を調べた結果、SSG, SSOに特有の破断特性は、試料表面の乾燥の速さ、焦げ速度の速さ、内部水分量の多さによって説明することができた。

(5) マイクロ波加熱したパンは急速に硬化し、Ovの約2倍大きい破断特性を示した。スチームを併用することによって硬化時間は遅くなったが、長く加熱するとMwと同じ硬さになった。

文 献

- 1) ナショナルスチームオーブンレンジNE-A300取扱説明書(2007)。
- 2) 家庭電気機器変遷史, 家庭電気文化会, p. 40 (1983)。
- 3) 河合 祐, 井上正信, スチーム機能付きオーブンレンジ, 松下テクニカルジャーナル, **52**, 442-446 (2006/12)。
- 4) シャープウォーターオープン取扱説明書 AX1000 (2006)。
- 5) 門馬哲也, 岸本卓士, 田中源基, 高見星司, 過熱水蒸気技術集成, NTS, pp. 31-42 (2005)。
- 6) 細見和子, 他 14 名, 過熱水蒸気オープンを用いた調理に関する基礎的研究: ハンバーグステーキ焼成時の温度履歴と製品について, 調理科学, **40**, 420-426 (2007)。
- 7) 大石恭子, 渋谷祥子, 過熱水蒸気が焼成品の調理特性に与える影響—スポンジケーキの場合—, 調理科学, **41**, 18-25 (2008)。
- 8) 肥後温子, 和田淑子, 加工小麦デンプンがクッキー様焼製品のテクスチャー特性に及ぼす影響, 日本食品科学工学会誌, **55**, 224-232 (2008)。
- 9) 肥後温子, 水上和美, 富永暁子, 乾熱加熱時における鉄製とフッ素樹脂加工アルミ製フライパンによる焦げ速度, 調理科学, **37**, 170-179 (2004)。
- 10) 肥後温子, 野口 駿, マイクロ波加熱によるパンの硬化過程, 日食工誌, **34**, 781-787 (1987)。
- 11) 酒井 昇, 福岡美香, 過熱水蒸気を用いた食品のベーキング, 食品工業, **48**, 40-48 (2005)。
- 12) シャープニュースリリース (2008年9月)。
- 13) Patricia, F. and Philippe, B., Reheating of a Chilled Dish of Mashed Potatoes in a Superheated Steam Oven. *J. Food Eng.*, **33**, 57-80 (1997)。
- 14) 伊與田浩志, 西村伸也, 野邑康弘, 過熱水蒸気乾燥における凝縮から蒸発への反転過程, 機械学会論文集, **63**, 2764-2770 (1997)。
- 15) 鈴木寛一, 過熱水蒸気の特性, 過熱水蒸気技術集成, NTS, pp. 3-16 (2005)。
- 16) 佐藤秀美, 畑江敬子, 島田淳子, 食品のクラフト層の形成および着色状態に及ぼすヒータの加熱特性の影響, 日本食品科学工学会誌, **42**, 643-648 (1995)。

(平成22年10月14日受付, 平成23年5月20日受理)