

過熱水蒸気による健康調理技術の開発

Development of Healthy Cooking Technology with Superheated Steam

門馬 哲也*
Tetsuya Kadoma

岸本 卓士*
Takushi Kishimoto

田中 源基*
Motoki Tanaka

高見 星司*
Seiji Takami

要 旨

水を100℃以上に加熱して生成した過熱水蒸気を用いて食品を調理することにより、脱油、減塩、及びビタミンCや油脂の酸化抑制等の効果があることを見出した。ここでは、過熱水蒸気調理における健康に対する効果の検証実験結果及びメカニズムについて説明する。

The authors established that using superheated steam, which is generated by heating water to above 100°C, leads to healthier cooking by reducing the fat and salt in foods as well as suppressing oxidation of vitamin C and fat.

This paper explains the mechanism of superheated steam cooking and presents the results of the verification experiments.

まえがき

近年、日本人の生活様式（ライフスタイル）が大きく変化し、食生活の欧米化（動物性脂肪の過剰摂取）・運動不足・ストレスの増加等により「生活習慣病」が増加していることから、健康に対する関心が年々高まっており、健康関連の商品が数多く開発、販売されている。

そのような社会的背景の中、我々は過熱水蒸気に着目し、特に食生活の面で健康をサポートする調理器を目的として開発を行い、その結果、脱油、減塩効果、更にはビタミンCの破壊抑制、油脂の酸化抑制効果があることを見出した。

今回、この過熱水蒸気の特長を生かした健康調理技術の効果と検証方法、検証結果について報告する。

1. 過熱水蒸気技術の特長

1.1 概要

過熱水蒸気とは飽和水蒸気を更に加熱した蒸気であり、大気圧では100℃より高い温度の蒸気で、無色透明のH₂Oガスである。

この過熱水蒸気は現在、工業的には食品の殺菌乾燥を含めた熱処理、廃棄物の処理、木材の熱処理、その他材料の乾燥や洗浄等、様々な用途に利用されており、以下の特長を有している。

(1) 大熱容量の気体のため熱伝達特性に優れてい

る。

(2) 加熱初期段階で、表面全体に水の凝縮が生じ、その後凝縮水の乾燥が始まる。

(3) 低酸素雰囲気での加熱が可能。

(4) 常圧での利用が可能であるため、安全に使用できる。

以下に、過熱水蒸気を調理に利用した場合の特長を詳しく述べる。

1.2 熱伝達特性

図1に示すように、通常オーブンでは、高温の空気が被加熱物に接触して熱を伝える対流伝熱(空気の比熱0.24cal/g/℃)により加熱される。一方、過熱水蒸気

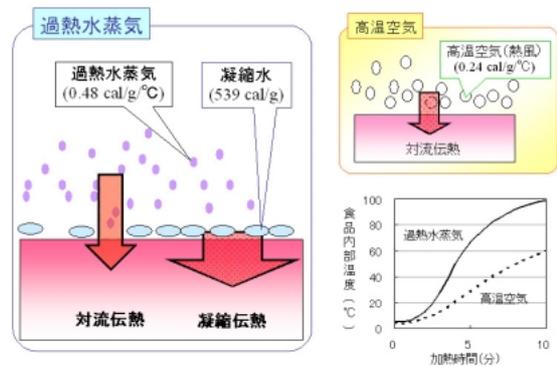


図1 過熱水蒸気の熱伝達特性

Fig. 1 Heat transfer characteristic of superheated steam.

* 電化システム事業本部 電化商品開発センター 第2開発室

では、対流伝熱（水蒸気の比熱 $0.48\text{cal/g/}^\circ\text{C}$ ）に加えて、被加熱物の表面で過熱水蒸気が凝縮する際に生じる凝縮伝熱により加熱される。この凝縮熱は、 539cal/g と大きく、被加熱物に大量の熱を与えることができるため、急速に加熱することが可能となる。また、過熱水蒸気は低温部に優先的に凝縮する特性により、加熱ムラが抑制される特長も有している。

1・3 凝縮～乾燥特性

図2は、過熱水蒸気加熱における食品の水分量変化である。過熱水蒸気が食品に接触するとただちに凝縮し、食品に凝縮水が付着するとともに、凝縮熱による大量の熱が伝達される。その後、食品から水分が蒸発し始め、復元過程を経てから乾燥が始まる¹⁾。従って、内部は水分を保持して、表面はパリッとした仕上がりが可能となる。

一方、高温空気の場合は、食品から水分が蒸発するのみであり、内外とも乾燥した状態となる。

1・4 酸素濃度

加熱室内に過熱水蒸気を投入し、加熱室内に元々存在していた空気を追い出すことで酸素濃度を低下させることが可能となる。

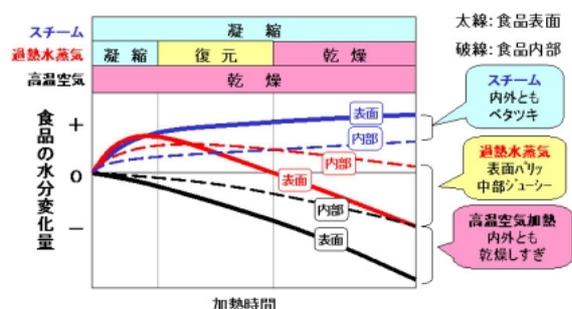


図2 過熱水蒸気加熱による食品の水分量変化
Fig. 2 Moisture amount change of food with superheated steam heating.

2. 実験装置及び方法

2・1 過熱水蒸気実験装置

過熱水蒸気実験装置を図3に示す。タンクの水を飽和水蒸気発生器に送水し、飽和水蒸気を生成する。生成された飽和水蒸気は加熱室背面のコンベクションダクト内に送られ、内部のコンベクションヒータで更に加熱され、 100°C 以上の過熱水蒸気として加熱室内に供給される。ここで加熱室内の温度設定は、コンベク

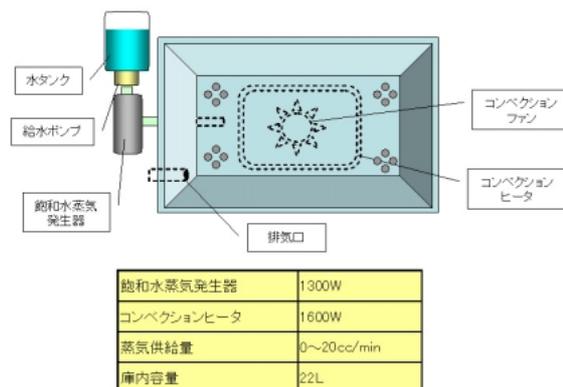


図3 過熱水蒸気実験装置及び仕様
Fig. 3 Superheated steam experiment equipment and specification.

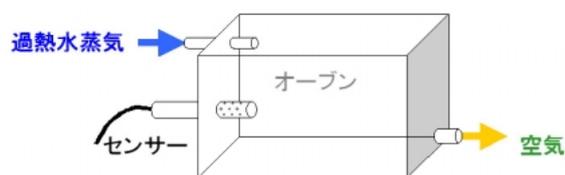


図4 酸素濃度測定方法
Fig. 4 Oxygen concentration measuring method.

ションヒータで制御可能であり、供給する蒸気量も給水ポンプで調整可能となっている。また、加熱室内を常圧に保つため、余剰気体を外部に排出する排気口が設置されている。

2・2 酸素濃度測定

図4は実験機を用いた無負荷での酸素濃度測定方法である。加熱室内に酸素濃度計（チノー社製高温用湿度計HN-Z）のプロープを挿入し、庫内温度 200°C にて予熱後、 14cc/min の過熱水蒸気を加熱室に投入して酸素濃度を測定した。

2・3 脱油効果検証実験

サンプルには牛肉を使用し、形状及び脂質量の個体差を減らすため、牛肉の赤身（ $50\text{mm} \times 60\text{mm} \times 20\text{mm}$ 、約 80g ）及び脂身（ $40\text{mm} \times 50\text{mm} \times 5\text{mm}$ 、約 14g ）を別々に成形し、赤身の上に脂身を乗せたものをロース擬似食材として用い、加熱は高温空気、過熱水蒸気いずれも 150°C 、 200°C で行った。脱油率は加熱前後の脂身の重量を測定して、脂身をすべて脂質と仮定し下式により算出した。

(脱油率) = $1 - (\text{加熱後の脂身重量}) / (\text{加熱前の脂身重量})$

2・4 減塩効果検証実験

サンプルには鶏のササミを使用し、形状及び塩分含有率の個体差を減らすため、重量比で10%の食塩を加えながらフードプロセッサで粉碎、攪拌し、円柱状の型（直径33mm、高さ23mm）を用いて成型したものを2個（約45g）ずつ用い、加熱は高温空気、過熱水蒸気いずれも150℃で行った。

加熱時に生じた落下物を純水で溶解して回収したもの（以下、落下物とする）及び、加熱後サンプルから純水で塩分を抽出したものについて、塩分濃度計（アタゴ社製ES-241）を使用し塩分量を測定した。

減塩率は、落下物、加熱後サンプルのそれぞれの塩分量から下式により算出した。

（減塩率）＝（落下物塩分量）／（（加熱後サンプル塩分量）＋（落下物塩分量））

2・5 ビタミンC破壊抑制効果検証実験

サンプルにはかぼちゃを使用し、形状及びビタミンC含有率の個体差を減らすため、皮、種及びわたを取り除き、10mm角の立方体に成形したものを多量に準備し、全量を攪拌後、1回の実験に用いる量（約70g、約60個）に取り分けたものを用い、加熱は高温空気、過熱水蒸気いずれも150℃で行った。また、加熱後のビタミンCの減少を防止するため、加熱終了5分後、液体窒素にて急冷した。

ビタミンC量は、ヒドラジンで誘導体化したものを、液体高速クロマトグラフ法で測定し、加熱前の単位重量あたりで算出した。ビタミンC残存率は、上記加熱サンプルと同時に用意した未加熱サンプルのビタミンC量を初期ビタミンC量とし下式により算出した。

（ビタミンC残存率）＝（加熱後ビタミンC量）／（初期ビタミンC量）

2・6 油脂酸化抑制効果検証実験

サンプルにはアジを使用し、初期の脂質酸化状態の個体差を減らすため、アジを3枚におろしたもの（約75g）を用いた。油脂酸化の程度は、過酸化価により評価した。過酸化価は脂質に含まれる不飽和脂肪酸の二重結合の酸化によって生じる過酸化物の量であり、脂質の初期酸化の度合を示すパラメータとなる。過酸化価の実験は、表面の焦げ状態が結果に大きく影響を与えると考えられるが、実験機の高温空気加熱では十分な焦げ色を付けることができないため、可動式の輻射ヒータを持つシャープ製RE-M210のグリル加熱を使用した。グリル加熱はサンプル上面からヒータまでの距離5cmで皮側8分加熱後、裏返し身側3分の合計11分加熱した。過熱水蒸気加熱は、庫内

温度280℃で11分加熱した。また、加熱後の油脂の酸化を抑制するため、加熱終了5分後に液体窒素で急冷した。過酸化価は、加熱後サンプルからクロロホルム-メタノール混液で脂質を抽出し、酢酸-クロロホルム法で測定した。

3. 実験結果

3・1 酸素濃度測定結果

図5は酸素濃度測定結果である。高温空気加熱では酸素濃度は約21%で一定であるが、過熱水蒸気加熱の場合は、過熱水蒸気の投入後、直ちに酸素濃度が低下し、4分後以降は0.1%以下を保持した。従って、過熱水蒸気を用いると、低酸素雰囲気での食品加熱が可能となることが確認できた。

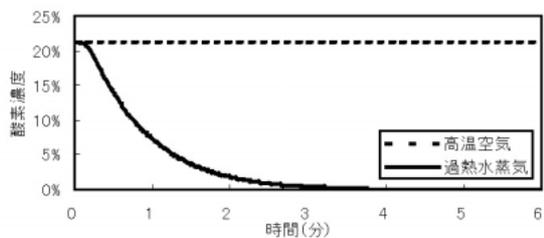


図5 酸素濃度の経時変化

Fig. 5 Change of oxygen concentration in oven.

3・2 脱油効果検証実験結果

図6に高温空気加熱と過熱水蒸気加熱による脱油率の変化を示す。150℃、200℃のいずれの温度においても、同じ加熱時間で比較すると、過熱水蒸気加熱では高温空気加熱の約2倍の脱油率となった。この様に、過熱水蒸気による加熱で脱油が多くなるメカニズムは以下の様に考えられる。

過熱水蒸気の中に食品を入れると、食品に触れた過熱水蒸気は温度が下がり、液体の水となって表面に付着する。この時、同時に凝縮熱が食品に与えられる。凝縮熱の熱量は非常に大きいので、食品の温度は即座に上昇し、食品中の油脂が早く溶け始める。更に加熱すると、油の粘度が下がるので流動性が良くなって自ら流出、あるいは食品が収縮することで油がしみ出てくる。表面である程度溜まった油脂は自然と滴り落ち、また凝縮水により洗い流される。一方、高温空気加熱では、対流伝熱のみの加熱であるため、過熱水蒸気加熱より昇温が遅く、また凝縮水の付着がないため、表面に溜まった油脂が滴り落ちるのに時間がかかる。これらの差により、脱油量の差が生じる。過熱水蒸気による脱油メカニズムの模式図を図7に示す。

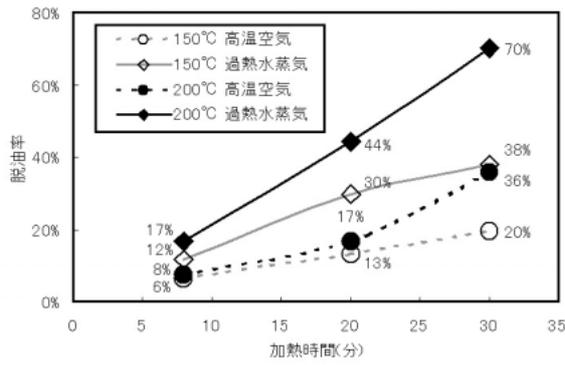


図6 脱油率の変化
Fig. 6 Change of a fat reduction rate.

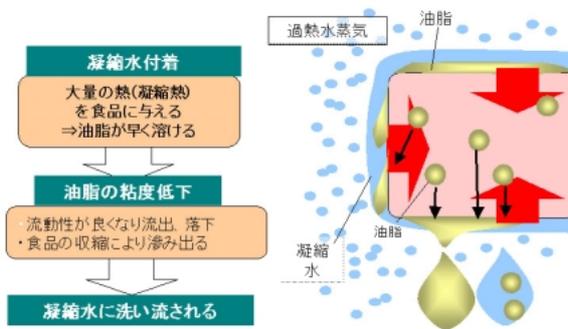


図7 脱油メカニズムの模式図
Fig. 7 Model of fat reduction.

3・3 減塩効果検証実験結果

図8に高温空気加熱と過熱水蒸気加熱による減塩率の変化を示す。高温空気加熱では塩分はほとんど減少していないが、過熱水蒸気加熱では、10%以上の塩分が減少した。このことより、過熱水蒸気には減塩効果があることが確認できた。また、過熱水蒸気加熱の減塩率は加熱10分後にはすでに10%に達し、その後はほぼ一定であることから、減塩効果は加熱初期にのみ

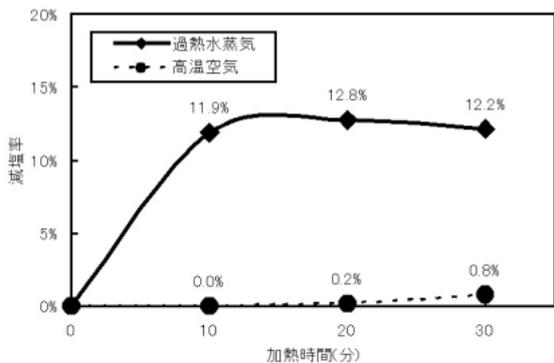


図8 減塩率の変化
Fig. 8 Change of salt reduction rate.

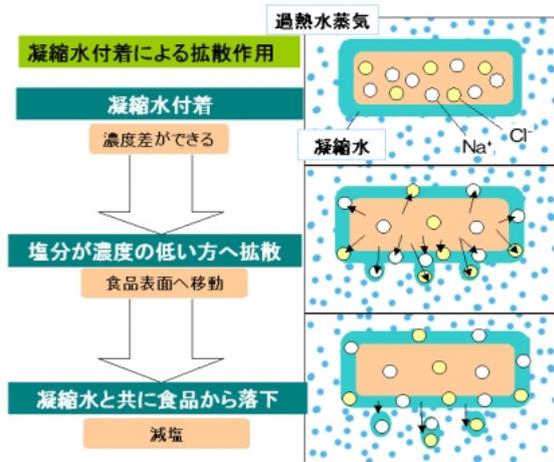


図9 減塩メカニズムの模式図
Fig. 9 Model of salt reduction.

生じ、加熱後半では生じていないことがわかる。

更に、別の実験で塩鮭の表面を水で洗ったものと洗わなかったものを過熱水蒸気で加熱して減塩率を測定した際、減塩率はほとんど同じであった。これは、塩分が塩鮭の内部から表面に移動していることを示唆している。これらのことから、過熱水蒸気による減塩は以下のメカニズムで生じていると考えられる。イオンは濃度の高いところから低いところに移動しようとする性質(拡散効果)がある。加熱初期、食品表面に凝縮水が付着すると、表面のナトリウムイオンが凝縮水に溶け込み洗い流される。更に凝縮水の付着とともに、食品表面近傍のナトリウムイオンが塩分濃度の低い凝縮水の方へ拡散するので、食品内部と表面近傍の塩分濃度差が生じる。従って、食品内部のナトリウムイオンも拡散効果で表面近傍に移動し、凝縮水が食品から滴り落ちるとともに食品から取り除かれる。

過熱水蒸気による減塩メカニズムの模式図を図9に示す。

3・4 ビタミンC破壊抑制検証実験結果

図10に高温空気加熱と過熱水蒸気加熱によるビタミンC残存率の変化を示す。高温空気加熱では、加熱時間が長くなるにつれてビタミンCが減少し、25分後には初期の半分以下にまで減少した。一方、過熱水蒸気加熱では、10分後と25分後のビタミンC残存率は約80%と一定の値で推移しており、ビタミンCの破壊が抑制されていることが確認できた。

ビタミンCは非常に酸素と反応しやすい物質である。過熱水蒸気加熱でビタミンCの破壊が抑制されるのは、先に示した酸素濃度結果の通り、酸素濃度が極

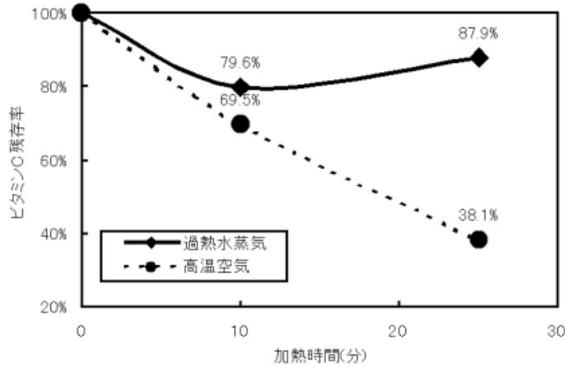


図10 ビタミンC残存率の変化
Fig. 10 Change of vitamin C residual rate.

めて低い状態での加熱であり、酸素との反応が抑制されているためと考えられる。一方、高温空気加熱では、酸素が存在する雰囲気中で加熱されることになるので、酸素との反応によるビタミンCの破壊が加熱とともに進行する。

3・5 油脂の酸化抑制検証実験結果

図11にグリル加熱と過熱水蒸気加熱によるサンプルの過酸化物価を示す。グリル加熱したものは過酸化物価が53.8meq/kgに対して、過熱水蒸気加熱では約半分の29.6meq/kgであった。

このことから、過熱水蒸気加熱ではビタミンCと同様に、低酸素雰囲気加熱により油脂の酸化が抑制されたといえる。またグリル加熱では、輻射による加熱ムラが生じやすくなっており、局部的に高温となり、更に酸化反応が起き易くなっていることも、この結果に影響を及ぼしていると考えられる。

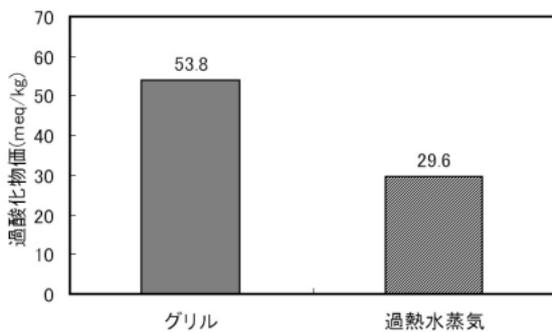


図11 過酸化物価の比較
Fig. 11 Comparison of peroxide value (POV).

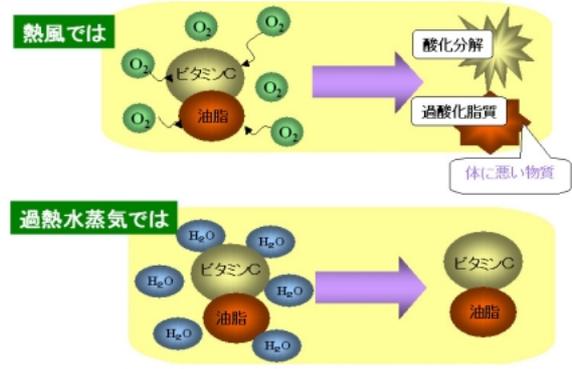


図12 ビタミンC破壊抑制及び油脂酸化抑制メカニズムの模式図
Fig. 12 Model of prevention of vitamin C decomposition and fat oxidation.

過熱水蒸気によるビタミンC破壊抑制及び油脂酸化抑制メカニズムの模式図を図12に示す。

むすび

過熱水蒸気を利用した調理器の開発において、以下の健康に対する効果が明らかとなった。

- (1) 脱油効果
- (2) 減塩効果
- (3) ビタミンCの破壊抑制効果
- (4) 油脂の酸化抑制効果

過熱水蒸気調理器は、新たな健康調理器として消費者に浸透しつつある。今後、この健康調理器を更に進化させ、より消費者に満足していただける商品にしていきたいと考える。

謝辞

本研究を行うにあたり、多大なご指導、ご鞭撻を賜りました大阪府立大学大学院農学生命科学研究科宮武教授並びに同工学研究科大西助教授に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 野邑奉弘, 伊與田浩志, “過熱水蒸気乾燥法”, 化学工学, 66, 7, pp.409-413(2002).

(2005年1月20日受理)