微細水滴を含む過熱水蒸気によるジャガイモの1次加工処理

五月女格, 鈴木啓太郎, 小関成樹, 坂本晋子, 竹中真紀子,
小笠原幸雄*, 名達義剛**, 五十部誠一郎[§]

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構食品総合研究所

* 株式会社タイヨー製作所

** 有限会社梅田事務所

Blanching of Potato with Superheated Steam Containing Micro-droplets of Hot Water

Itaru Sotome, Keitaro Suzuki, Shigenobu Koseki, Kuniko Sakamoto, Makiko Takenaka,
Yukio Ogasawara*, Yoshitaka Nadachi** and Seiichiro Isobe[§]

National Food Research Institute, 2-1-12, Kannondai, Tsukuba 305-8642

* Taiyo Seisakusho, 226-10, Shimizukawa, Hokuto 041-1221

** Umeda Jimusho, 1-15-32-506, Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo 158-0087

A newly developed oven system, which generates superheated steam consisting of micro-droplets of hot water (Aqua-gas) by spraying heated water into a heating chamber, was applied to the blanching of potato. It was thought that the micro-droplets would increase the heat transfer coefficient of the heating medium to the extent that they would prevent the deterioration of foods due to drying during the heating process. Blanching of the potatoes was conducted using Aqua-gas (115°C), superheated steam (115°C) and hot water (100°C). The thermal properties of the heating mediums and the qualities of the potato processed with the heating mediums were compared. Though a greater heat transfer coefficient was measured in the Aqua-gas, no significant differences were observed in temperature distributions or the progress of peroxidase inactivation among the heating media. Heat transfer simulations showed that the temperature distribution in the potatoes was only dependent upon thermal diffusivity of the potato since the heat transfer coefficients of the heating mediums were sufficient. The potatoes processed with the Aqua-gas and with the superheated steam were firmer and brighter than the potatoes processed with the hot water. In addition, weight loss of the potatoes was reduced and any *Bacillus subtilis* would have been sterilized by the Aqua-gas.

(Received Nov. 14, 2005 ; Accepted May 15, 2006)

日本国内のジャガイモ生産は北海道に集中しており収穫時期や貯蔵期間が限られ品不足になる期間が存在することから、その安定的な周年流通が望まれている¹⁾。現在、ジャガイモは利用目的に応じて温度を変えて貯蔵されているが、貯蔵温度が5°C以上になると萌芽、重量減少、腐敗等の問題が発生し、5°C以下の低温貯蔵においてはデンプンが減少し還元糖の含有量が増加するとされている²⁾。還元糖を多く含むジャガイモは油加工時に褐変を起こし、アクリルアミド発生量が増加するという問題が指摘されている³⁾⁴⁾。これらの問題を解決する一つの方法として、ブランチングによりジャガイモ中の酵素を失活させ貯蔵する方法が考えられ、これに関する研究が幾例も行われている^{5)~7)}。

近年、過熱水蒸気を応用した食品加工に関する研究が盛んに行われており^{8~14)}、また過熱水蒸気を農水産物のブランチングに応用した研究例も報告されている⁵⁾。著者等は従来の過熱水蒸気オーブンとは異なり、高圧下で加熱した水を加熱チャンバ内に噴霧する事により、高温の微細水滴を含んだ常圧の過熱水蒸気雰囲気を生じ、食品加工を行うシステムを開発した¹⁵⁾。水是水蒸気と比較して極めて高い単位体積あたりの熱容量を持ち、高い熱伝達性を有する事から、微細水滴を含んだ過熱水蒸気は通常の過熱水蒸気と比較して更に高い熱伝達性を持つものと期待される。また通常の過熱水蒸気による食品加工においては、加熱対象である食品の乾燥速度は主に食品への熱流入量に支配されることから、乾燥速度の制御ひいては食品の含水率を制御することは困難である。このことは過熱水蒸気を用いた食品加熱においては、食品の過度な乾燥による品質低下ならびに製品歩留りの低下を招く可能性があることを意味して

〒305-8642 茨城県つくば市観音台 2-1-12

* 〒041-1221 北海道北斗市清水川 226-10

** 〒158-0087 東京都世田谷区玉堤 1-15-32-506

[§] 連絡先 (Corresponding author), seiichi@affrc.go.jp

いる。微細水滴を含んだ過熱水蒸気による加熱調理においては、微細水滴が食品表面に付着することによる食品の乾燥速度の制御，すなわち食品の含水率の調整が可能になると期待される。これは微細水滴を含んだ過熱水蒸気による食品加熱においては、加熱時間と食品の含水率の組み合わせにおいて自由度が生じ、製品の品質ならびに歩留りの向上が期待できることを意味する。

本研究では微細水滴を含んだ過熱水蒸気、通常の過熱水蒸気ならびに熱水を用いたジャガイモのブランチングを行い、それぞれの加熱特性ならびに加熱処理されたジャガイモの品質についての比較を行った。加熱媒体の加熱特性については、加熱処理中のジャガイモ表面ならびに中心温度測定を通して比較し、更に加熱媒体から整形したジャガイモ試料へのみかけの熱伝達率測定を通して比較を行った。更に加熱処理中のジャガイモについて酵素の失活を確認するため、ジャガイモ中に広く分布し、耐熱性が高くブランチングの指標として用いられることが多いペルオキシダーゼ¹⁶⁾¹⁷⁾の活性について簡易測定を行った。ペルオキシダーゼはアスコルビン酸やその他の物質を酸化し野菜等の風味を低下させ、また変色させるとされている¹⁸⁾。また加熱処理前後のジャガイモについて力学的特性ならびに色彩の変化を測定し、また加熱処理によるジャガイモの質量減少率を測定した。更に走査型電子顕微鏡にて加熱処理前後のジャガイモの微細構造観察を行った。また枯草菌孢子 (*Bacillus subtilis* PCI219) を接種したジャガイモの加熱処理を行い生存孢子数の測定を行った。

実験方法

1. 微細水滴を含んだ過熱水蒸気について

微細水滴を含んだ過熱水蒸気発生システムの概略図を Fig. 1 に示した。このシステムにおいて使用される原水は初めに、加熱器配管内における固形成分の析出によるスケール発生を防止するため軟水化処理される。処理された水は定量ポンプにてチャンバ内壁面に設置されたヒータ内に圧送され、一部は蒸発しノズルから熱水と水蒸気が混合した状態にてチャンバ内に噴霧される。0.2~0.35 MPa に加圧されたヒータ内にて飽和温度まで加熱された水および水蒸気は、チャンバ内に噴霧され常圧に戻る。このとき噴霧された水の一部は直ちに蒸発して水蒸気となるが、一部は微細水滴となりチャンバ内に液体として一定時間存在する。これらの微細水滴は最終的にはチャンバ内で蒸発し水蒸気となるが、チャンバ内壁面のヒータ出力を調節し供給水量とチャンバ内温度のバランスをとりながら熱水および水蒸気を噴霧し続けることにより、チャンバ内に常時、100℃以上の過熱水蒸気と約 100℃の微細水滴が混在した雰囲気を作り出す事が可能である。この微細水滴を含んだ過熱水蒸気を以後アクアガスと呼ぶ。

実験には株式会社タイヨー製作所にて作製されたアクア

Fig. 1 Principle of the Aqua-gas generation system

ガス試作 1 号機を用いた。アクアガス試作 1 号機の加熱チャンバの内寸は 604×616×478 mm (WDH) であり、容積は約 178 l である。チャンバ正面には内部観察用の窓を持つドアが取り付けられている。チャンバ内の左右の壁面にはヒータが取り付けられており、装置に圧送された水の加熱とチャンバ内の過熱水蒸気の加熱が行われる。装置にはジルコニア式酸素濃度計 (EXAOXY, 横河電機株式会社, 東京) ならびにジルコニア式高温湿度計 (HA400, 横河電機株式会社, 東京) が設置されており、加熱チャンバ内の酸素濃度ならびに水蒸気濃度が測定可能である。加熱チャンバ内には棚を 2 段装着することが可能である。加熱チャンバ内には加熱媒体を攪拌するため、直径 200 mm, 回転速度可変のファンが装着されている。

2. 供試材料ならびに加熱処理条件

供試材料にはつくば市内の小売店にて購入した北海道産ならびに茨城県産のジャガイモ (男爵) を用いた。ジャガイモの初期品温は 7~10℃ に調整した。アクアガス加熱処理は本章 1 節にて述べたアクアガス試作 1 号機を用いて行った。処理時の加熱チャンバ内のアクアガス気相部分の温度はアクアガス試作機が最も安定してアクアガスを発生させることが可能な 115℃ とした。アクアガスは加熱装置へ 47 ml/min の水を供給することにより発生させ、発生されたアクアガスは 115℃, 常圧にて約 50 l/min と推算された。加熱処理時は加熱チャンバ内に設置されたファンを 1200 rpm で回転させアクアガスを攪拌し、また酸素濃度ならびに水蒸気濃度の測定を行った。過熱水蒸気による加熱処理はスーパースチームオープン (SDAHW, 株式会社中国メンテナンス) を用いて行った。加熱チャンバ内温度等の処理条件はアクアガス処理時と同等となるように調整し

た。熱水による加熱処理は、約 81 の沸騰させた熱水中にジャガイモを浸漬することにより行った。加熱処理中は熱水の攪拌は行わず自由対流させた。

3. ジャガイモ温度の測定と予測

(1) ジャガイモの温度測定

温度測定には質量が 140～160 g のジャガイモを選別し用いた。ジャガイモ中心ならびに表面に熱電対を取り付け、加熱処理中の温度を測定した。ジャガイモ中心温度については、ノギスを用いてジャガイモの径を測定し、最も短い径となる軸に沿って直径 0.5 mm の先端の鋭利な金属針にてジャガイモ中心まで穴を開け、線径 0.2 mm の T 型熱電対を挿入し測定した。熱電対の先端約 1 mm 以外はテフロン被覆されており、被覆を含めた熱電対の断面は短軸 0.4 mm、長軸 0.8 mm の楕円に近い形状であった。熱電対を挿入した際にジャガイモに開けた穴は変形し、熱電対と密着している様子が観察された。ジャガイモ表面温度は同型の熱電対の先端約 3 mm をハンダ付の後、カッターナイフにて幅約 0.25 mm、厚さ約 0.15 mm に切削した物を表皮直下に挿入し測定した。アクアガス、過熱水蒸気ならびに熱水のそれぞれの加熱媒体について 5 回ずつ測定を行った。

(2) 熱伝達率測定

ジャガイモ表面における加熱媒体からの熱伝達率は次のように測定した。はじめにジャガイモをコルクボーラにて直径 12 mm、長さ 60 mm の円柱状に整形した。次に円柱状試料に軸方向から中心部へ熱電対を挿入した。試料を鉛直に保ち加熱処理を行い、試料中心温度を測定した。温度測定はそれぞれの加熱媒体について 5 回ずつ行った。ここで、試料を十分に長い円柱とみなし試料内部における発熱が無いと仮定すると、試料中心温度を表す関数 $\theta_{r=0}(t)$ は次に示す熱伝導微分方程式を解くことにより得られる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (1)$$

式(1)において t は時間、 α は熱拡散係数、 r は中心軸からの距離である。初期品温は θ_0 で一定とし、次に示す境界条件を与え、差分法（陽解法）により $\theta_{r=0}(t)$ を得た。

$$q = h(\theta_{\infty} - \theta_{r=R}) \quad (2)$$

式(2)において q は試料表面における熱流束、 h は熱伝達率、 θ_{∞} は加熱媒体温度、 R は円柱の半径である。このとき得られた中心温度 $\theta_{r=0}(t)$ は熱伝達率 h の関数となることから、 h を回帰変数として準ニュートン法にて関数 $\theta_{r=0}(t)$ を実測された試料中心温度に非線形回帰することにより熱伝達率を得た。本研究で用いたジャガイモの熱拡散係数ならびに比熱は水分ならびに比重から推算した¹⁹⁾。水分は 105℃、24 時間の炉乾法にて、比重は水置換法にて測定し、それぞれ 83.0%、1067 kg・m⁻³ であった。推算された熱拡散係数は 1.44×10⁻⁷ m²・s⁻¹、比熱は 3610 J・kg⁻¹・K⁻¹

であった。なお、アクアガスおよび過熱水蒸気による加熱処理時における厳密な熱移動解析を行うためには、試料表面における凝縮水層の存在、アクアガスおよび過熱水蒸気の熱伝達性の試料温度依存性等を考慮する必要がある。しかしながら本研究では各加熱媒体を用いた際のジャガイモ円柱中心温度の上昇を単純に比較するため、 h をみかけの熱伝達率として扱い、また加熱媒体温度 θ_{∞} を 100℃ とすることによりジャガイモ表面における水移動を無視し、測定された試料中心温度を式(1)および式(2)で表されたモデルに非線形回帰を行った。

(3) ジャガイモ内部の温度予測

ジャガイモを球体とみなし、半径方向のみに熱移動が起こりジャガイモ内部における発熱は起こらないと仮定するとジャガイモ内部における熱伝導は次式にて表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (3)$$

式(3)において r は中心からの距離である。ジャガイモの初期品温は 10℃ で均一とし式(2) で示した境界条件を与え、式(3)を差分法（陽解法）にて解きジャガイモ内部の温度変化を予測した。ジャガイモの半径は 15, 20, 25 ならびに 30 mm とし、熱拡散係数、比熱ならびに比重は前節に示した値を用いた。ジャガイモ表面における加熱媒体からの熱伝達率 h は前節における熱伝達率測定から得られた値を基準に設定した。また加熱媒体の温度は 100℃ とした。計算されたジャガイモ内部温度変化から、中心温度が 90℃ に達するまでに要する加熱時間を予測した。

4. 酵素活性測定

加熱処理されたジャガイモ中のペルオキシダーゼ活性の簡易測定を行った。ジャガイモをアクアガス、過熱水蒸気ならびに熱水にて加熱処理し氷水にて冷却した。加熱時間は 5, 10, 15, 20, 25 ならびに 30 分とした。加熱処理されたジャガイモについて中心を通る面で切断し試料切片を調整した。試料断面に 1% グアヤコール水溶液を均一に滴下した後、3% 過酸化水素水を均一に滴下した。試料を 2 分間静置し酵素活性が残存している領域を呈色させた。試料断面を撮影し画像処理により試料断面積ならびに呈色された領域の面積を求め、これらの面積比を計算した。

5. 力学的特性、色彩ならびに質量減少率の測定

未処理のジャガイモならびにアクアガス、過熱水蒸気および熱水にて 30 分間の加熱処理を施し氷水にて十分に冷却したジャガイモについて、力学的特性、色彩ならびに質量減少率の測定を行った。

力学的特性については、クリープメータ（RE-33005、株式会社山電）を用い、直径 2 mm の円柱形プランジャーを毎秒 0.5 mm の速度で試料に貫入させ破断応力ならびに破断歪率を測定した。測定部位はジャガイモ表面（表皮付）ならびに中心部とし、それぞれの部位から厚さ約 15 mm の試

料を 3 片ずつ切り出し、測定を行った。1 処理区に対して 5 個のジャガイモを供試した。測定は室温にて行った。

色彩については色彩色差計 (CR-300, ミノルタ株式会社) を用いて測定した。測定部位は表皮 3 箇所ならびに断面中央部付近 3 箇所とし、1 処理区に対して 5 個のジャガイモを供試した。表色系は $L^*a^*b^*$ (CIE1976) を用いた。

また加熱処理前後のジャガイモの質量を測定し、加熱処理による質量減少率を計算した。それぞれの加熱媒体による実験に対して 7 個のジャガイモを供試した。

6. 微細構造観察

未処理のジャガイモならびに 30 分間の加熱処理を施し氷水にて十分に冷却したジャガイモを冷凍機にて -80°C まで冷却し急速に凍結させた。凍結させたジャガイモを真空凍結乾燥機 (TF20-85ATNNS, 株式会社宝製所) にて乾燥させ、低真空走査型電子顕微鏡 (JSM-5600 LV, JEOL) を用いて加速電圧 5~10 kV, 真空度 10~20 Pa で観察した。観察部位は表皮ならびに中心部断面とした。

7. *B. subtilis* 殺菌試験

B. subtilis PCI219 を標準寒天培地上 ($\phi 90\text{ mm}$) において 37°C で 2 週間培養して孢子を形成させた。寒天平板上のコロニーを滅菌コンラージ棒にて掻き取り、5 ml の滅菌生理食塩水中に分散させ、遠心分離 ($3000\times g$, 10 分) によって細胞を沈殿・収集した。収集した細胞を生理食塩水中 (5 ml) に再度分散し、 80°C , 20 分間の加熱処理によって *B. subtilis* PCI219 孢子液 ($10^7\sim 10^8\text{ CFU/ml}$) を調製した。調製した孢子液 0.1 ml をジャガイモ試料に塗布した。加熱処理を行わない試料は直ちにストマック袋に入れ、他の試料はアクアガス、過熱水蒸気および熱水により 30 分間加熱した後、直ちにストマック袋に入れ氷水にて 30 分間冷却した。試料に滅菌生理食塩水を加えストマックにて摩砕処理を行った後、試料液 1 ml を滅菌シャーレに取り標準寒天培地で混釈し、 37°C にて 48 時間培養した後、発生したコロニー数を測定した。

実験結果および考察

1. 温度測定結果と予測温度分布

測定された加熱処理中のジャガイモ表面温度を Fig. 2 に示した。Fig. 2 には加熱開始後 5 分間のジャガイモ表面温度の変化を示した。アクアガスならびに熱水による加熱においてはほぼ等しい表面温度上昇が見られたが、過熱水蒸気処理においては前者と比較して加熱開始直後の試料表面温度上昇に遅れが見られた。この加熱媒体間におけるジャガイモ表面温度の上昇速度の違いは、加熱媒体の熱伝達率の違いによるものと考えられた。

次にジャガイモ中心温度が 90°C に達するまでの時間ならびに加熱媒体からジャガイモへの熱伝達率を Table 1 に示した。ジャガイモ表面温度の変化については加熱媒体間に違いが見られたものの、ジャガイモ中心温度の変化に

Fig. 2 Surface temperature of the potatoes during the heating process

Table 1 Time required to increase the temperature of the potato cores to 90°C and heat transfer coefficient h from the heating medium to the potato

	Time required (min)	h ($10^3\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
Aqua-gas	$29.10\pm 0.96\text{ a}$	$4.26\pm 0.12\text{ a}$
Superheated steam	$29.08\pm 1.07\text{ a}$	$3.48\pm 0.21\text{ b}$
Hot water	$29.85\pm 1.27\text{ a}$	$3.98\pm 0.24\text{ ab}$

Values with the same letter were not significantly different (Turkey's HSD).

は加熱媒体間の違いは見られず、中心温度が 90°C に達するまでの加熱時間はいずれの加熱媒体においても 29 分から 30 分の間となり違いは見られなかった。それぞれの加熱媒体の熱伝達率については若干の違いが見られ、アクアガス、熱水、過熱水蒸気の順に大きく、ジャガイモ表面温度の上昇速度の順と一致した。

Fig. 3 にジャガイモ中心温度が 90°C に達するまでの時間をシミュレーションにより予測した結果を示した。計算に用いた熱伝達率は $2.0\times 10^2\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ から $1.0\times 10^5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ の範囲に設定した。Fig. 3 より、いずれの大きさのジャガイモにおいても加熱媒体の熱伝達率が小さい場合は熱伝達率の上昇にともないジャガイモ中心温度を 90°C まで加熱するのに要する時間が短くなるが、熱伝達率が大きくなるに従い熱伝達率を増加させてもジャガイモの加熱に要する時間はほぼ変化しなくなることが分かる。これは熱伝達率が大きくなるに従いジャガイモ表面から内部への熱伝導に対してジャガイモ表面における加熱媒体からの熱伝達が飽和し、ジャガイモ自身の熱拡散係数がジャガ

Fig. 3 Predicted time required to increase the temperature of the potato core to 90°C

イモ内部温度の上昇に対して支配的になることを示しており、ジャガイモが大きくなるに従い熱伝達率が小さな領域でこの傾向が現れ始める。実験に用いたジャガイモは半径が25～30 mmであったが、この場合熱伝達率が $10^3 \sim 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 以上の領域にてこの傾向が現れると考えられる。このため Table. 1 に示した各加熱媒体の熱伝達率には違いが見られたもののジャガイモ中心温度が90°Cに達するまでに要する時間には差が現れなかったと考えられた。

しかしながら一方で阿部ら⁵⁾は過熱水蒸気および熱水等による食品加熱の比較から、過熱水蒸気は食品表面温度を速やかに上昇させるものの食品内部の温度上昇は緩慢であるとしている。この原因の一つとして阿部らが用いた過熱水蒸気の温度が200°Cと本研究で用いた過熱水蒸気の温度115°Cと比較して高温であったことが考えられた。過熱水蒸気加熱においては試料表面温度が低い段階では水蒸気の凝縮による高い熱伝達が起こるが、試料温度が上昇するに従い試料への水蒸気の凝縮は試料からの水分蒸発へと反転する。この時、過熱水蒸気ならびに加熱チャンバ壁面から試料へ対流ならびに放射により伝達された熱の一部は試料からの水分蒸発に使われるため²⁰⁾、加熱媒体から試料への見かけの熱伝達率は非常に小さくなると考えられる。この時、試料の種類、加熱条件等にもよるが、試料の乾燥が起こることにより表面に乾燥層が形成され、試料内部への熱伝達が小さくなる可能性も考えられる。阿部らの研究においては過熱水蒸気加熱により速やかな食品表面の乾燥が観察されたとしている。また阿部らの実験条件では過熱水蒸気の温度は高温空気と比較して過熱水蒸気の乾燥速度が速くなる逆転温度以上であったと推察され²¹⁾、食品表面の速

Fig. 4 Changes in the ratio of enzymatic active area of the potato intersection by the heating processes

やかな温度上昇と乾燥が起こったことにより、食品内部の温度上昇が緩慢になったと考えられた。以上のことから過熱水蒸気による食品加熱においては、過熱水蒸気の温度により加熱特性が大きく変化することを留意しなければならないことが分かる。アクアガスによる食品加熱についても同様に、加熱媒体温度により加熱特性が変化すると考えられることから、今後はアクアガスの温度による加熱特性の変化についても解明していく必要があると言える。

2. 加熱処理時間と酵素活性

加熱処理したジャガイモ断面においてペルオキシダーゼが活性を示した面積のジャガイモ断面積に対する比を Fig. 4 に示した。加熱時間が長くなるに従い周縁部から酵素の失活が進み酵素活性を示す面積比が減少した。ジャガイモ内部で90°Cに達した領域においてペルオキシダーゼが失活したと見られ、本実験に用いたジャガイモではいずれの加熱媒体においても25～30分の加熱処理でペルオキシダーゼが完全に失活したと考えられた。また酵素失活の進行に加熱媒体間の差はほぼ見られなかった。これはいずれの加熱媒体による処理においてもジャガイモ内部の温度上昇はほぼ等しかったためと考えられた。

3. 力学的特性、色彩ならびに質量減少率の測定結果

加熱処理によるジャガイモ中心部の破断応力ならびに破断歪率の変化を Fig. 5 に示した。加熱処理によりジャガイモ組織は軟化するため破断応力については非常に小さくなったが、熱水による加熱処理において軟化が著しかった。熱水で処理したジャガイモは破断応力、破断歪率共に小さく、脆く崩れやすい状態となった。ジャガイモ表層部については加熱処理方法による破断応力ならびに破断歪率

Fig. 5 Changes in breaking stress and breaking strain of the potato core after heating

Symbols with the same letter were not significantly different (Turkey's HSD). NH: Not heated, AQG: Aqua-gas, SHS: Superheated steam, HW: Hot water.

Table 2 Changes in the color of the potato epidermis associated with heating

	L*	a*	b*
Not heated	63.70±0.83 a	3.99±0.28 a	34.14±0.36 a
Aqua-gas	55.12±0.62 b	-1.46±0.20 b	22.32±0.53 b
Superheated steam	56.45±0.65 b	-2.06±0.20 b	23.50±0.51 b
Hot water	52.28±0.79 c	-0.48±0.27 c	22.99±0.52 b

Values with the same letter were not significantly different (Turkey's HSD).

に有意な差は見られなかった。これはジャガイモ表皮側からプランジャーを貫入させ測定を行ったが、各加熱媒体がジャガイモ表皮の力学的特性に及ぼす影響の差が小さく、かつジャガイモ表層部の力学的特性に及ぼす表皮の影響が大きかったためと考えられた。表層部の柔組織については熱水にて処理したジャガイモに著しい軟化が確認された。アクアガスならびに過熱水蒸気にて処理したジャガイモは比較的軟化も抑制され形状も良好に保たれていた。

次に加熱処理によるジャガイモ表皮の色彩の変化について Table 2 に示した。いずれの加熱媒体による加熱処理においてもジャガイモ表面色は暗くなり鮮やかさも低下したが、熱水にて処理したジャガイモはその傾向が顕著であった。ジャガイモ中心部の色彩変化については加熱媒体間の差は見られなかった。

加熱処理によるジャガイモの質量減少率は、アクアガス

Not heated

Aqua-gas

Superheated steam

Hot water

Fig. 6 Microstructure of the potato surfaces after treatment

処理で (0.83 ± 0.30) %, 過熱水蒸気処理で (2.86 ± 0.27) %, 熱水処理で (0.74 ± 0.16) % となった。過熱水蒸気処理ではジャガイモの乾燥が進んだが、アクアガス処理においては微細水滴がジャガイモ表面に付着し乾燥を防いだため質量減少が抑制されたと考えられた。

4. 加熱処理による微細構造の変化

ジャガイモ表面の微細構造観察の結果を Fig. 6 に示した。加熱処理を施していないジャガイモ表面には表皮細胞のものと見られる網目構造が観察され、またアクアガスならびに過熱水蒸気にて加熱処理を施したジャガイモについても同様な微細構造が観察された。一方、熱水にて加熱処理を施したジャガイモ表面には明らかな微細構造の変化が観

Fig. 7 Microstructure of the potato cores after treatment

察された。またジャガイモ中心部の微細構造観察の結果を Fig. 7 に示した。加熱処理されたジャガイモには細胞壁と見られる構造が観察された。熱水処理されたジャガイモではアクアガスならびに過熱水蒸気処理されたジャガイモと比較して、比較的滑らかな微細構造が観察された。熱水処理におけるこれらの微細構造変化の原因としては、ジャガイモ中の固形成分が熱水へ溶出したことなどが考えられた。

5. アクアガスの *B. subtilis* 殺菌効果

ジャガイモ試料から検出された耐熱性菌の生存孢子数を Fig. 8 に示した。孢子液を塗布し、加熱処理を行わなかったジャガイモ試料からはおよそ 10^6 CFU・ ml^{-1} の耐熱性菌が検出されたが、孢子液を塗布した後、アクアガス処理を施したジャガイモ試料からは菌は検出されず、また過

Fig. 8 Viability in the *B. Subtilis* spore counts on potatoes

NH : Not heated, AQG : Aqua-gas, SHS : Superheated steam, HW : Hot water.

熱水蒸気処理を施した試料からも菌はほぼ検出されなかった。しかしながら熱水処理を施した試料からは平均して 10^3 CFU・ ml^{-1} の耐熱性菌が検出された。熱水処理を施した試料については検出された耐熱菌数が 10^2 CFU・ ml^{-1} 以下のものから 10^4 CFU・ ml^{-1} 以上までのものとバラツキが非常に大きかった。この原因として、熱水処理においては表面に付着した孢子が主に熱水によって洗い流されたことにより耐熱菌数が減少したためと考えられた。ジャガイモ表面の凹凸等の形状により試料ごとに表面洗浄の効果に差が現れ、また熱水処理では加熱殺菌としては不十分であったため、上記の結果となったと考えられた。一方、アクアガスおよび過熱水蒸気処理では、加熱開始時には試料表面に凝縮した水が流れ落ちることにより試料表面が洗浄され、さらに 30 分間の加熱により試料表面温度がアクアガスでは約 103°C 、過熱水蒸気では約 106°C まで上昇したことにより高い殺菌効果がみられたと考えられた。以上の結果よりアクアガス処理した食材は無菌状態にて保存することにより微生物による劣化を抑止することができると考えられた。

要 約

115°C のアクアガス、 115°C 過熱水蒸気ならびに 100°C の熱水にてジャガイモの加熱処理を行った。加熱媒体からジャガイモへの熱伝達率を測定した結果、アクアガスの熱伝達率が最も高かったが、加熱処理中のジャガイモ中心部の温度履歴に加熱媒体間の差は見られなかった。また加熱処理によるジャガイモ中のペルオキシダーゼ失活の進行にも加熱媒体間の差は見られなかった。この原因は、いずれの加熱媒体による加熱処理においてもジャガイモ表面にお

ける熱伝達は十分に大きく、ジャガイモ内部温度変化はジャガイモ自身の熱拡散係数に律速されていたためであったことが、ジャガイモ内部における熱伝導シミュレーションの結果から確認された。

また、それぞれの加熱媒体により加熱処理されたジャガイモの品質を比較した結果、アクアガスならびに過熱水蒸気により加熱処理されたジャガイモが熱水にて処理されたジャガイモと比較して、硬さも保たれ色彩も良好であった。走査型電子顕微鏡によるジャガイモ微細構造の観察結果、熱水により加熱処理されたジャガイモにおいては熱水への固形成分の溶出が推察された。このことから固形成分の溶出の有無が加熱処理されたジャガイモの品質に影響を及ぼしたと考えられた。またアクアガスによる加熱処理では過熱水蒸気処理と比較して質量減少を抑制することができた。更に、アクアガス処理によりジャガイモ表面に塗布した *B. subtilis* 胞子を死滅させることが可能であった。

以上のことからアクアガスを用いることにより、熱水による加熱処理と比較して良好な品質にて、また過熱水蒸気処理と比較して小さな質量減少にて、ジャガイモのブランチングを行うことが可能であると結論付けられた。またアクアガスを用いて加熱処理されたジャガイモを無菌状態にて保存することにより、高品質なジャガイモの長期間貯蔵が可能になると期待された。今後はジャガイモの酵素失活に必要な加熱温度条件等を詳細に検討し、アクアガスにより加熱処理されたジャガイモの貯蔵性ならびに貯蔵されたジャガイモの品質変化について解明していく予定である。

この研究は生物系特定産業技術研究支援センター「生物系産業創出のための異分野融合研究支援事業」での実施課題「アクアガスを用いた高品質汎用食材の新規調製技術の開発」によるものである。ここに記して関係各位に謝意を表する。

文 献

- 1) 樋元淳一, 生食用・加工用ジャガイモの長期貯蔵技術, 日本食品科学工学会第 52 回大会講演要旨集, pp. 25-26, 札幌 (2005).
- 2) 大久保増太郎, バレイショ, 「野菜の鮮度保持」, 第 6 版, 大久保増太郎編, (養賢堂, 東京), pp. 232-237 (1993).
- 3) Chuda, Y., Ono, H., Yada, H., Ohara-Takada, A., Matsuura-Endo, C. and Mori, M., Effects of Physiological Changes in Potato Tubers (*Solanum tuberosum* L.) after Low Temperature Storage on the Level of Acrylamide Formed in Potato Chips. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **67** (5), 1188-1190 (2003).
- 4) Ohara-Takada, A., Matsuura-Endo, C., Chuda, Y., Ono, H., Yada, H., Yoshida, M., Kobayashi, A., Tsuda, S., Takigawa, S., Noda, T., Yamauchi, H. and Mori, M., Change in Content of Sugars and Free Amino Acids in Potato Tubers under Short-Term Storage at Low Temperature and the Effect on Acrylamide Level after Frying. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **69** (7), 1232-1238 (2005).

- 5) 阿部 茂, 吉川修司, 中野敦博, 河野慎一, 熊林義晃, 長島浩二, 農水畜産物のブランチングの代替としての常圧過熱水蒸気の利用, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 平成 16 年度 産業技術研究助成事業 研究成果報告書 (最終), (2005).
- 6) Arroqui, C., Rumsey, T.R., Lopez, A. and Virseda, P., Losses by diffusion of ascorbic acid during recycled water blanching of potato tissue. *J. Food Eng.*, **52**, 25-30 (2002).
- 7) González-Martínez, G., Ahrné, L., Gekas, V. and Sjöholm, L., Analysis of temperature distribution in potato tissue during blanching and its effect on the absolute residual pectin methylesterase activity. *J. Food Eng.*, **65**, 433-441 (2004).
- 8) Burg, P. and Fraile, P., Vitamin-C destruction during the cooking of a potato dish. *Food Sci. Technol.-Leb.*, **28**, 506-514 (1995).
- 9) Fraile, P. and Burg, P., Reheating of a chilled dish of mashed potatoes in a superheated steam oven. *J. Food Eng.*, **33**, 57-80 (1997).
- 10) Fraile, P. and Burg, P., Influence of convection heat transfer on the reheating of a chilled ready-cooked dish in an experimental superheated steam cell. *J. Food Eng.*, **33**, 263-280 (1997).
- 11) 伊與田浩志, 小西洋太郎, 吉田香梨, 西村伸也, 野邑奉弘, 吉田正道, 過熱水蒸気および高温空気気流中での炭水化物食品の乾燥—ジャガイモスライス表面の着色特性—, 化学工学論文集, **29**, 94-99 (2003).
- 12) Markowski, M., Cenkowski, S., Hatcher, D.W., Dexter, J. E. and Edwards, N.M., The effect of superheated-steam dehydration kinetics on textural properties of Asian noodles. *Trans. ASAE*, **46**, 389-395 (2003).
- 13) Huang, T., Ho, C. and Fu, H., Inhibition of lipid oxidation in pork bundles processing by superheated steam frying. *J. Agric. Food Chem.*, **52**, 2924-2928 (2004).
- 14) Iyota, H., Konishi, Y., Inoue, T., Yoshida, K., Nishimura, N. and Nomura, T., Popping of amaranth seeds in hot air and superheated steam. *Dry. Technol.*, **23**, 1273-1278 (2005).
- 15) 五十部誠一郎, 竹中真紀子, 小笠原幸雄, 名達義剛, 高品質食品加熱加工のためのアクアガスTM処理装置の開発とその機構, 日本食品工学会第 5 回年次大会講演要旨集, p. 80, 東京 (2004).
- 16) Anthon, G.E. and Barrett D.M., Kinetic Parameters for the Thermal Inactivation of Quality-Related Enzymes in Carrots and Potatoes. *J. Agric. Food Chem.*, **50**, 4119-4125 (2002).
- 17) Severini, C., Baiano, A., De Pilli, T., Carbone, B.F. and Derossi, A., Combined treatments of blanching and dehydration: study on potato cubes. *J. Food Eng.*, **68**, 289-296 (2005).
- 18) Burnette, F.S., Peroxidase and Its Relationship to Food Flavor and Quality: A Review. *J. Food Sci.*, **42**, 1-6 (1977).
- 19) 日本熱物性学会編, 「熱物性ハンドブック (第 1 版)」(養賢堂, 東京), p. 443 (1990).
- 20) 伊與田浩志, 西村伸也, 野邑奉弘, 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**, 2764-2770 (1997).
- 21) 伊與田浩志, 西村伸也, 野邑奉弘, 過熱水蒸気乾燥における複合熱伝達特性 (気流からの対流とガス熱放射による複合熱伝達の数値計算), 日本機械学会論文集 (B 編), **64**, 821-828 (1998).

(平成 17 年 11 月 14 日受付, 平成 18 年 5 月 15 日受理)