冷凍米飯の品質に及ぼす凍結, 貯蔵および 解凍条件の影響

矢内和博*・三浦 靖*・中村良司**・西ノ宮武***
原田 努****・小林昭一*

Effect of Freezing, Storage and Thawing Conditions on Quality of Frozen Cooked Rice

Kazuhiro YANAI*, Makoto MIURA*, Ryouji NAKAMURA**, Takeshi NISHINOMIYA***,
Tsutomu HARADA**** and Shoichi KOBAYASHI*

* *The United Graduate School of Agricultural Sciences of Iwate University, 3-18-8, Ueda,
Morioka-shi, Iwate 020-8550*

** *Ajinomoto Co., Inc., Food Research & Development Lab., Food Material Research Lab.,
1-1, Suzuki-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 210-0801*

*** *Ajinomoto Frozen Foods Co., Inc., 1-16-7, Kyobashi, Tyuo-ku, Tokyo 104-8315*

**** *Ajinomoto Co., Inc., Quality Assurance & External Scientific Affairs Dept., 1-15-1,
Kyobashi, Tyuo-ku, Tokyo 104-8315*

The effect of freezing and storage conditions on several characteristics of cooked rice balls thawed with microwave-heating were investigated in order to improve the quality of them. Freezing temperature of $-13.0\sim-31.0^{\circ}\text{C}$, storage temperature of -31.0°C and storage period within 7days prevented increasing in white cloudiness and yellowness, and maintained the breaking characteristics of the rice balls compared with the values of control samples. In the thawing process with microwave-thawing, no certain tendency was observed between the heating time and the arrival time to the final temperature among the samples. This might be attributed that the rice ball consisted of three-dimensional assembly of rice grain with not same particle shape. The moisture contents in the central part of rice ball was lower than that in the surface part of it after microwave-thawing. As for this, the moisture in the surface part of the rice ball was maintained by wrapping while molecules inside the rice balls were diffused toward surface part by the higher vapour pressure at the center part of the rice balls rising a rapid temperature increase. It was suggested that starch retrogradation not be a predominant role of deterioration of frozen rice, because the degree of gelatinization of starch for rice ball thawed spontaneously showed no certain tendency to the freezing temperature, the storage temperature, and the storage period.

(Received Mar. 7, 2001 ; Accepted Jul. 17, 2001)

加工食品の消費者志向は、健康、安全性、簡便性、アメニティ(楽しさ、心地よさ)に集約される¹⁾。調理の簡便化志向に対応して需要拡大を続けているのが冷凍食

品、特に調理済み冷凍食品である。冷凍食品は、保存性があるためにまとめ買いが可能で買い物の省力化が図られる。また、貯蔵が可能であるために予備的な食品の役

* 岩手大学大学院連合農学研究科 (〒020-8550 岩手県盛岡市上田 3-18-8)

** 味の素株式会社食品研究所原料・素材基盤研究所 (〒210-0801 神奈川県川崎市川崎区鈴木町 1-1)

*** 味の素冷凍食品株式会社 (〒104-8315 東京都中央区京橋 1-16-7)

**** 味の素株式会社本社品質保証部 (〒104-8315 東京都中央区京橋 1-15-1)

割も担う。

(社)日本冷凍食品協会の平成 12 年度報告によれば、冷凍食品の国内生産高は 149 万 8 千トンであり、日本では生産数量に占める業務用比率が 69.7% と高いのが特徴である。生産数量の内訳は、第 3 位のピラフの構成比が 7.2%、第 14 位のおにぎりでは 1.6% であり、年々その生産高が増加する一方で、製品の品質における問題点が指摘されている。例えば、冷凍米飯では米飯粒の白濁や艶の消失、硬化などの劣化が問題となっているが、原因や解決策が十分に明確にされていない。

凍結点以上の温度環境 (0~40℃) におけるデンプンの老化に関しては、速度論的な解析、添加物の影響が従来から検討されてきた。一方、凍結点以下の温度環境における研究は極めて少ない^{2)~12)}。米飯に関しては、凍結温度¹³⁾、貯蔵温度¹⁴⁾¹⁵⁾、凍結法¹³⁾、解凍法¹³⁾、凍結前の米飯の品種、貯蔵期間、炊飯方法¹⁶⁾ が米飯の色特性や水分含量、食品テクスチャーやデンプン糊化度などに及ぼす影響が報告されているが、凍結・貯蔵・解凍条件の系統的な解明には至っていない。

そこで、本研究ではマイクロ波加熱解凍を前提とした冷凍おにぎりの品質向上に向けて、米飯塊の凍結と貯蔵条件が米飯の諸特性に及ぼす影響を系統的に明確にすることを試みた。

実験方法

1. 試料

試料米には 1998 年滋賀県産「日本晴」を用い、玄米のままハイバリアー性フィルム製袋 (CANSFILM G-type, 四国化工(株)) に密封して 4℃ の低温庫内で貯蔵した。精米機 (CPH301S, キセキ(株)) を用い、精米歩留まり 90% (w/w) で搗精を行った。

2. 炊飯

精白米 0.80 kg をアルミニウム製ボウル (φ270 mm×H110 mm) に入れ、これに水道水 2 l を加えて手攪拌して洗浄する操作を 3 回繰り返した。続いて水道水 2 l で常法により研ぐ操作を 5 回繰り返した。加水量が精白米重量の 1.4 倍となるように脱塩水 1.12 kg を加え¹⁷⁾ 25℃ で 60 分間浸漬後¹⁸⁾ に炊飯した。温度・圧力制御型炊飯装置 (オーエヌ総合電機(株)) により炊飯し、炊飯中の釜内部の温度履歴を計測した (Fig. 1)。なお、市販炊飯器の内部底面に位置する伝熱面の温度履歴を基にして炊飯温度プログラムを作成した。この温度プログラムで運転させた場合の炊飯釜内部 2 カ所 (Fig. 2) の温度プロファイルを温度プログラムと併せて Fig. 3 に示した。なお、炊飯は 25℃ の恒温室で行った。

3. 米飯の成形

米飯粒の付着を防ぐために内側にシリコン樹脂加工したパーチメント紙製クッキングシートを Fig. 4 に示

- A: Personal computer (PC9801 nL/A, NEC Corp.)
- B: Data acquisition system (NR-250, KEYENCE Corp.)
- C: Controller (SR187 01, ON total electric Corp.)
- D: Rice cooker (SR-FT18, National Corp.)
- E: Electromagnetic valve (KL71, ON total electric Corp.)
- F: Drain tank
- G: Thermocouple probe (TD-11S, SHIMADEN Corp.)

Fig. 1 Schematic diagram of rice-cooking system

Fig. 2 Temperature measuring points in the rice cooker

したアルミニウム製成形円筒内に張り付け、塩化ビニル樹脂製食品包装用ラップフィルムで覆ったテフロン板 (W 150 mm×D 150 mm×H 8 mm) 上に乗せた。このアルミニウム製成形円筒に米飯を 50.0 g 充填した。そして、押付蓋を両面テープで粘着させた円板状プランジャ (No. 19, ϕ 55 mm×H 8 mm) および最大力 19.6 N のロードセルを装着した圧縮・引張型レオメータ (RE-33005, (株)山電) を用い、圧縮速度 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ で圧縮成

形した。成形した米飯塊を上記したラップフィルムで包装し、ポリプロピレン製密閉容器に入れて室温になるまで放冷した。なお、米飯塊の調製は 25°C の恒温室内で行った。

4. 米飯塊の凍結および貯蔵

Table 1 に示した条件で米飯塊を凍結・貯蔵した。なお、凍結・貯蔵温度が $-7.0^\circ\text{C} \sim -37.0^\circ\text{C}$ の場合には低温恒温恒湿機 (PL-1S および PL-2S, タバイエスベック (株)) および恒温恒湿機 (MTH-4200, 三洋電機 (株))、 -22.0°C の場合には冷凍冷蔵庫 (341S1, (株)大和冷機工業) をそれぞれ用いた。米飯塊の中心点と側表面 (側面高の中心) の温度における凍結過程での温度を温度データロガー (U LOGGER L822 TYPE-T, K 型熱電対, ϕ 0.5 mm 温度プローブ, ユニバルス (株)) を用いて測定した。凍結曲線において、米飯塊が初期温度から凍結点までに冷却する時間 (凍結開始時間), 米飯塊が凍結状態に変わる時間, そして凍結した米飯塊が庫内温度にまで冷却する時間を合わせて全凍結時間と定義した。また、未凍結試料を対照区と表記した。

5. 米飯塊の解凍

所定の凍結貯蔵後に電子レンジオーブン (ER-EX55 (T), 出力 980 W, 東芝 (株)) を用い、米飯塊 1 個をラップフィルムに包んだまま回転テーブル上面の幾何学的中心点に置き、レンジモード: 強 (500 W) で 2 分間の解凍を行った。米飯塊の中心点と側表面 (側面高の中心) に

Fig. 3 Temperature control program and temperature profile inside the rice cooker
Measuring points (CH-1 and CH-2) are represented in Fig. 2.

Fig. 4 Schematic representation of rice-molding apparatus

おけるマイクロ波解凍中の温度をケイ光式光ファイバー温度測定システム (FX-9020, $\phi 1$ mm 温度プローブ, 安立計器(株)) を用いて測定した。解凍後の米飯塊は包装したまま 25°C の恒温室内で品温が 25°C になるまで放冷した。

6. 解凍した米飯塊の特性

(1) 水分変化量

解凍後の米飯塊の表層部と中心部の 2 カ所の水分含量を 135°C , 24 時間の常圧加熱乾燥法¹⁹⁾ で測定した。米飯塊の上面から厚さ 5 mm の部分を表層部, 米飯塊中心の一辺が 10 mm の立方体を中心部とした。なお, 水分変化量は, 凍結・貯蔵・解凍処理後の水分の増減を未処理の値を基準として相対値で表した。

(2) 色特性

色彩色差計 (CR-200, 2° 視野, D65 光源, ミノルタ(株)) により, 解凍後の米飯塊の上面中央部および 1/2 の高さ (15 mm) での断面中央部について測定し, L^* 値は白濁度, a^* 値は赤色-緑色度, b^* 値は黄色-青色度のそれぞれ指標として用いた。

(3) 破断特性

解凍後の米飯塊について, 円板状プランジャ (No. 19, $\phi 55$ mm $\times$ H 8 mm) および最大力 19.6 N のロードセルを装着した圧縮・引張型レオメータ (RE-33005, (株) 山電製) を用い, 距離分解能 0.01 mm, 圧縮速度 $1\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, データ収納間隔を 100 ms に設定し, 最大ひずみ 0.7 で単軸圧縮破断試験を行った。試料表面の乾燥およびプランジャと米飯塊との摩擦を防ぐために, 測定前にプランジャの米飯塊との接触面にシリコン油 (東芝シリコン, 東芝シリコン株式会社) を塗付した。応力-ひずみ曲線には 2 つの変曲点が存在し, その第 1 変曲点での応力を破断応力, ひずみを破断ひずみとし, 米飯塊の

Table 1 The treatment conditions for freezing and storage of cooked rice balls

Experiment	Freezing temperature [$^{\circ}\text{C}$]	Storage temperature [$^{\circ}\text{C}$]	Storage period [day]
Y ₁	-31	-31	7
Y ₂	-31	-31	23
Y ₃	-31	-13	7
Y ₄	-31	-13	23
Y ₅	-13	-31	7
Y ₆	-13	-31	23
Y ₇	-13	-13	7
Y ₈	-13	-13	23
Y ₉	-22	-22	15
Y ₁₀	-7	-22	15
Y ₁₁	-37	-22	15
Y ₁₂	-22	-7	15
Y ₁₃	-22	-37	15
Y ₁₄	-22	-22	28
Y ₁₅	-22	-22	2

米飯粒同士の粘性および米飯粒自体の硬さを反映した粒状集合体としての破断特性を測定した。

(4) デンプンの糊化度

凍結貯蔵後の米飯塊を 25℃ の恒温室内で自然解凍し、水分含量の測定部位と同様に表層部と中心部の糊化度を β -アミラーゼ-プルランナーゼ (BAP) 法²⁰⁾ で測定した。

7. 統計解析

基本統計量の計算および平均値の差の検定には表計算ソフトウェア (マイクロソフトエクセル 2000, マイクロソフト (株)) を用いた。

結果及び考察

1. 凍結過程での米飯塊の温度変化

米飯塊の側面と中心点の凍結曲線を Fig. 5 に示した。それぞれの庫内温度で凍結した場合の凍結点は、米飯塊の側表面において -0.5°C , -1.6°C , -0.4°C , -1.0°C , -0.9°C であったのに対し、中心点では -0.2°C , -1.6°C ,

-0.6°C , -0.7°C , -0.8°C であった。米飯塊は米飯粒の三次元の集合体であるため温度測定プローブと米飯粒との接触状態がいずれの凍結条件でも同一であるとは限らないので凍結点が一致しなかったと思われる。また、凍結開始時間は、側表面においてそれぞれ約 115 分間、約 62 分間、約 33 分間、約 10 分間、約 11 分間であったのに対し、中心点ではそれぞれ約 116 分間、62 分間、45 分間、約 35 分間、37 分間であった。すなわち、庫内温度が低いほど凍結点までに冷却する時間が短かった。また、全凍結時間は、それぞれ約 380 分間、215 分間、200 分間、110 分間、105 分間であったが米飯塊の側表面および中心点とではほぼ同等であった。すなわち、庫内温度が低いほど当然であるが庫内温度に達する時間は短かった。

2. マイクロ波加熱解凍過程での米飯塊の温度変化

-15°C で凍結して 2 週間凍結貯蔵した 4 個の米飯塊のマイクロ波加熱解凍での解凍曲線を Fig. 6 に示した。4 個の試料とも解凍開始 30~50 秒後までは側表面の方

Fig. 5 Temperature profiles of cooked rice balls during freezing process

The interrupted line is the temperature of geometrical center point of the cooked rice ball, the solid line is that on the surface of the side of it, and the bold solid line is that of the inside of chamber at that treatment condition.

A, Frozen at -7.0°C ; B, frozen at -13.0°C ; C, frozen at -22.0°C ; D, frozen at -31.0°C ; E, frozen at -37.0°C .

Fig. 6 Temperature profiles of frozen cooked rice ball in thawing process with microwave
Samples were frozen and stored at -15.0°C for 2 weeks.

が中心点よりも約 $1\sim 5^{\circ}\text{C}$ だけ高かったが、それ以降は中心点の温度上昇速度の方が大きくなり、早く最終温度に到達した。しかし、中心点と側表面の温度曲線が交差する加熱時間および最終温度の到達時間が試料により異なった。これは米飯塊が決して粒子形状が同一ではない米飯粒の不均一な集合体であることに起因すると思われる。すなわち、マイクロ波の吸収が一樣ではなく加熱状態が部位により異なること、ならびに米飯粒同士が連結することにより形成される連続相と空隙との空間配置が部位により異なるために伝導伝熱が一樣ではないことが考えられる。

さて、米飯塊の表面部と中心部の解凍曲線が解凍開始後 30～60 秒後に交差する現象²¹⁾²²⁾は、マイクロ波による誘電加熱と伝導伝熱のバランスから説明できる。家庭用電子レンジで用いられるマイクロ波は、周波数が 2450 MHz であり、空気中での波長が 122 mm (真空中でのマイクロ波の伝播速度を $2.998 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ とする)、定在波の波長が 61 mm である。このマイクロ波において、水と水の比誘電率と誘電損失係数の比較から水は氷に比べて著しく誘電加熱されやすい。しかし、半減深度や熱伝導率は氷の方が大きいため、内部まで誘電加熱されやすく伝熱しやすい²³⁾。したがって、米飯塊の解凍初期には米飯塊表面部の水が融解されてマイクロ波を

より吸収しやすくなり加熱されるが、内部の凍結相の融解のための潜熱放出に消費されるので凍結点を維持したまま解凍界面が中心部に進行する。この間に米飯塊の中心部までマイクロ波が進入しているので解凍が起きている。米飯塊の外側の解凍相と中心部の解凍相との間の凍結相が解凍されるまで米飯塊中心部が凍結点を維持するが、凍結相が全て消失すると加熱が加速され、米飯塊の表面部よりも温度が高くなると思われる。

3. 凍結と貯蔵条件が米飯塊の水分変化量に及ぼす影響

米飯塊の水分含量の解凍前後での増減を相対値として表現した水分変化量を Table 2 に示した。米飯塊の表層部では水分含量が対照区と同等もしくは若干増加した試験区が多くみられた。一方、米飯塊の中心部ではほとんどの試験区で水分含量が対照区と同等もしくは減少した。

米飯塊の中心部では温度上昇が急激なために (Fig. 6) 水蒸気圧が表層部よりも高くなり、水分子は外側へ拡散する。これが表層部に到達したときには、包装により蒸散が妨げられているので、表層部の水分含量が高くなると考えられる。

4. 凍結と貯蔵条件が米飯塊の色特性に及ぼす影響

解凍した米飯塊の色特性を Table 2 に示した。まず、

米飯粒の L^* 値は、米飯塊の上面中央部において試験区 Y_8 と試験区 Y_{12} が他の試験区よりも有意に大きかった。また、試験区 Y_8 と貯蔵温度のみが異なる試験区 Y_6 、ならびに試験区 Y_{12} と貯蔵温度のみが異なる試験区 Y_{13} の L^* 値は、対照区とほぼ同じであり、貯蔵温度が冷凍米飯の色特性に影響を与えると考えられる。一方、米飯塊の断面中央部では、上面中央部と同様に試験区 Y_8 と試験区 Y_{12} の L^* 値が他の試験区よりも有意に大きかった。さらに、試験区 Y_2 、試験区 Y_4 、試験区 Y_6 、および試験区 Y_8 においても L^* 値が他の試験区よりも有意に大きかった。これらの試験区は、それぞれ試験区 Y_1 、試験区 Y_3 、試験区 Y_5 および試験区 Y_7 よりも貯蔵期間のみが長い試験区である。したがって、貯蔵期間は冷凍米飯の中央部の色特性に影響を与えると考えられる。また、各試験区で上面中央部位と断面中央部を比較すると、すべての試験区において断面中央部の方が L^* 値は有意に大きいまたはほぼ同じであった。米粒は胚乳組織構造の細胞配列の関係で主に長軸方向に膨潤するという異方性があり、炊飯の際には長軸に垂直な方向に亀裂・裂溝が配向する²⁴⁾。この亀裂・裂溝は、炊飯の進行にともなって胚乳組織の膨潤やデンプンの糊化・膨潤により塞がれ、外部からの水の浸入がないために捕捉された水は周囲に移行するために空洞を形成することが知られている²⁵⁾。そして、この空洞以外の部位では炊飯の進行とともに水分分布の均一化が進む。解凍後の米飯塊の白濁には、凍結・貯蔵過程で米飯粒に起こる氷結晶成長により胚乳組織が押しやられて解凍後に上記の空洞が成長したり、新たに微細な空隙が発生すること、ならびに解凍過程で米飯塊の水分含量に勾配が生じて中心部に近いほど低水分となり、デンプンの再糊化が十分に進まないことなどが関連していると考えられる。

次に、米飯塊の a^* 値は、凍結温度、貯蔵温度および貯蔵期間との間に一定の傾向を示さなかった。一方、米飯塊の b^* 値は、米飯塊の上面中央部において試験区 Y_1 、試験区 Y_5 および試験区 Y_7 で対照区よりも有意に小さく、黄変が抑制された。しかし、米飯塊の断面中央部の b^* 値は、ほとんどの試験区で対照区に比べて有意に増加し、黄変が認められた。米飯塊の中心部は解凍工程の早い時期から高温にさらされるので、米飯粒中に存在するグルコースやフルクトースなどの単糖やマルトオリゴ糖²⁶⁾と遊離アミノ酸²⁷⁾とのアミノ・カルボニル反応、糖のカラメル化反応、脂質の酸化・分解などが原因であると思われる。

5. 凍結と貯蔵条件が米飯塊の破断特性に及ぼす影響

米飯の力学的物性は、単軸圧縮・引張型レオメータやテクスチュロメータなどを用いた米飯粒の圧縮特性測定²⁸⁾²⁹⁾、押出セルに充填した米飯粒の押出特性測定³⁰⁾³¹⁾、せん断型レオメータを用いた動的粘弾性測定³²⁾、筋電計を用いた筋活動量測定 (EMG)³³⁾などの手法で評価されてきた。しかし、いずれも米飯粒間の空隙を無視して試料全体をあたかも均質なゲル状体と見なしたり、1粒または複数粒の粒体内の性質のみを測定している。そこで、二次元粒状態モデルで2軸圧縮曲線と空隙量の変化が測定されている³⁴⁾。米飯粒の表面全体は厚さがおおむね100~200 μm の表面付着層によって被覆されている³⁴⁾。この付着層の主成分は、コメデンプン粒と胚乳細胞および胚乳細胞の集合体であり、米粒内部から表面に移行、ないしは一旦炊飯液中に放出されてから炊飯の沸騰期に米飯粒表面に付着する。この表面付着層が関与する米飯粒同士の粘着性は上記の研究では考慮されていない。そこで、本研究では米飯塊の単軸圧縮試験での応力-ひずみ曲線に見られる2つの変曲点のうち、第1変曲点での応力を破断応力、ひずみを破断ひずみとし、米飯塊の米飯粒同士の粘着性および米飯粒自体の硬さを反映した粒状集合体としての破断特性を測定した。

米飯塊の破断応力は、試験区 Y_1 、試験区 Y_3 および試験区 Y_5 以外の試験区で凍結・貯蔵・解凍処理により増加した (Table 2)。また、米飯塊の破断ひずみも全ての試験区において対照区よりも有意に増加した。冷凍米飯の食品テクスチャーを改善するためには、破断応力と破断ひずみの増加を抑制しなければならない。米飯塊の破断応力が対照区での値と有意差がなかったのは試験区 Y_1 、試験区 Y_3 および試験区 Y_5 であった。また、米飯塊の破断ひずみが対照区での値に比較して約18%増加した0.26にとどまったのは、試験区 Y_1 、試験区 Y_2 、試験区 Y_4 、試験区 Y_6 、試験区 Y_{14} であった。つまり、対照区での破断特性値に近い値を示したのは試験区 Y_1 と試験区 Y_5 であった。一方、これらとは逆に試験区 Y_{12} では破断応力が対照区での値の約2倍、破断ひずみも約1.3倍に増加した。これらの結果から、米飯塊の破断特性は貯蔵温度と貯蔵期間に大きく影響されることが明らかになった。すなわち、本実験の場合には米飯塊の破断特性を対照区での値に維持するためには凍結温度が-13.0~-31.0℃であれば貯蔵温度を-31℃程度の低温に維持する必要がある。しかし、米飯塊の破断特性の変化は貯蔵期間1週間程度という比較的短時間で生じることがわかった。

Table 2 Effect of freezing, storage and thawing conditions on the mechanical

Experimental	Moisture change*		L*		a*	
	Surface	Center	Surface	Center	Surface	Center
Control**	0 (62.5%)		69.60±0.97 ^a		-2.15±0.06 ^a	
Y ₁	0.01±0.01 ^a	-0.04±0.02	68.7±1.33 ^a	69.4±1.53 ^a	-2.20±0.15 ^a	-2.27±0.07
Y ₂	0.02±0.01	-0.10±0.02	70.7±0.66 ^a	71.1±0.95	-2.34±0.08	-2.53±0.08
Y ₃	0.01±0.02 ^a	-0.03±0.03	69.7±0.90 ^a	70.3±0.84 ^a	-2.27±0.05	-2.40±0.08
Y ₄	0.02±0.02 ^a	-0.05±0.02	70.0±0.90 ^a	71.1±0.64	-2.20±0.04 ^a	-2.28±0.36
Y ₅	0.03±0.01	-0.12±0.03	69.5±0.77 ^a	69.5±1.05 ^a	-2.16±0.10 ^a	-2.32±0.04
Y ₆	-0.01±0.01	-0.06±0.00	70.6±0.61 ^a	71.0±0.49	-2.24±0.11 ^a	-2.41±0.04
Y ₇	-0.05±0.02	-0.13±0.04	70.0±0.97 ^a	70.2±1.33 ^a	-2.17±0.10 ^a	-2.32±0.12
Y ₈	0.01±0.01 ^a	-0.07±0.00	71.0±0.76	71.7±1.12	-2.20±0.10 ^a	-2.46±0.05
Y ₉	0.01±0.02 ^a	-0.03±0.02 ^a	69.5±1.14 ^a	70.2±0.92 ^a	-2.15±0.19 ^a	-2.17±0.09 ^a
Y ₁₀	0.05±0.04 ^a	0.01±0.04 ^a	69.7±0.59 ^a	70.1±1.11 ^a	-2.29±0.11	-2.49±0.07
Y ₁₁	0.00±0.01 ^a	0.07±0.04 ^a	69.8±0.37 ^a	70.5±0.70 ^a	-2.09±0.08 ^a	-2.41±0.06
Y ₁₂	-0.02±0.02 ^a	-0.05±0.00	72.4±1.05	72.7±1.16	-2.49±0.12	-2.41±0.51 ^a
Y ₁₃	0.01±0.03 ^a	0.00±0.03 ^a	69.6±0.51 ^a	69.5±0.96 ^a	-2.35±0.08	-2.50±0.05
Y ₁₄	0.02±0.00	-0.03±0.01	68.8±0.33 ^a	70.6±0.36 ^a	-2.18±0.06 ^a	-2.35±0.18
Y ₁₅	-0.02±0.05 ^a	0.02±0.03 ^a	69.5±0.88 ^a	70.0±0.62 ^a	-2.21±0.13 ^a	-2.46±0.09

Mean±standard deviation (water content, n=3 ; color properties, n=5 ; mechanical properties, n=6 ;

* Relative value on the water content against the water content before freezing-thawing treatment.

** Without freeze-thaw treatment.

Values within a column followed by the same letter are not significantly different (P<0.05).

6. 凍結と貯蔵条件が米飯塊のデンプンの糊化度に及ぼす影響

自然解凍した米飯塊の表層部および中心部のデンプンの糊化度を Table 2 に示した。米飯塊の表層部と中心部におけるデンプンの糊化度が対照区での値と同程度に維持されたのは、凍結温度と貯蔵温度が-22~-37℃というように低温である試験区 Y₂, 試験区 Y₉, 試験区 Y₁₁, 試験区 Y₁₃, 試験区 Y₁₅ であった。一方、これらとは逆に試験区 Y₃, 試験区 Y₆, 試験区 Y₇ では、米飯塊の表層部および/または中心部のデンプンの糊化度が対照区での値よりも有意に低く、糊化度 75~86% であった。

米飯塊の白濁と黄変、破断応力と破断ひずみの増加から冷凍米飯としての品質が最も劣化すると思われる試験区 Y₁₂ でのデンプンの糊化度は、対照区での値より有意に小さかったが、全試験区中での最低値ではなかった。このように、自然解凍した米飯塊のデンプンの糊化度には、凍結温度や貯蔵温度や貯蔵期間との間に一定の傾向、すなわち貯蔵温度が低く貯蔵期間が短ければデンプンの糊化度も低下しないという知見¹⁵⁾ は適用できなかった。したがって、米飯塊の白濁、破断応力と破断ひ

ずみの増加にはデンプン老化が関連してはいるが、冷凍米飯の品質劣化の主原因ではないと思われる。

本研究では、冷凍おにぎり製造に基礎的な知見を与えるために米飯塊の凍結・貯蔵条件が米飯の諸特性に及ぼす影響を検討した。米飯の凍結、貯蔵、解凍の各工程での熱移動と物質移動を工学的に解析するためには、米飯粒の三次元粒状集合体に適用できる熱・物質移動モデルを作成し、凍結界面や解凍界面の移動速度、水分子の移動速度などを算出しなければならない。また、米飯の力学物性評価のためには米飯塊の米飯粒同士の粘着性および米飯粒自体の硬さを記述する粒状集合体力学モデルを作成しなければならない。これらは本研究の今後の課題である。

要 約

マイクロ波加熱解凍を前提とした冷凍おにぎりの品質向上に向けて、米飯塊の凍結条件と貯蔵条件が米飯の諸特性に及ぼす影響を明確にすることを検討した。その結果、次のことがわかった。

(1) 凍結温度を-13.0~-31.0℃, 貯蔵温度を-31.0℃,

properties and degree of gelatinization of starch of cooked rice balls

b*		Breaking stress	Breaking strain	Degree of gelatinization (%)	
Surface	Center	[kPa]	[-]	Surface	Center
1.26±0.16 ^{a)}		7.8±0.22 ^{a)}	0.22±0.01 ^{a)}	96.2±2.86 ^{a)}	
0.72±0.21	1.56±0.45 ^{a)}	8.4±0.66 ^{a)}	0.26±0.01	85.74±3.72	88.71±0.66
1.13±0.27 ^{a)}	2.78±0.43	13.2±1.72	0.26±0.02	95.14±2.00 ^{a)}	94.20±0.95 ^{a)}
1.53±0.64 ^{a)}	1.59±0.21	9.8±2.23 ^{a)}	0.28±0.02	75.89±2.97	85.88±3.55
1.73±0.62 ^{a)}	2.91±0.35	12.4±0.58	0.26±0.01	80.88±2.17	89.77±1.62
0.78±0.38	1.73±0.28	8.3±0.61 ^{a)}	0.26±0.02	83.62±2.66	79.74±3.45
1.43±0.54 ^{a)}	2.97±0.45	11.0±0.77	0.27±0.01	77.24±3.30	75.29±5.96
0.93±0.22	1.87±0.48	11.5±0.77	0.29±0.02	76.42±6.07	84.64±0.43
1.51±0.25 ^{a)}	3.23±0.34	12.7±1.51	0.27±0.01	90.56±1.25	85.75±0.65
1.83±0.80 ^{a)}	2.70±0.31	12.3±1.37	0.27±0.02	93.02±2.52 ^{a)}	96.22±0.70 ^{a)}
1.95±0.32	2.89±0.30	12.0±1.58	0.27±0.01	91.13±2.79	93.01±2.13 ^{a)}
1.64±0.25	2.65±0.29	12.5±0.84	0.27±0.01	94.71±3.30 ^{a)}	95.04±1.46 ^{a)}
1.84±0.21	3.29±0.84	15.1±0.58	0.29±0.01	87.72±2.24	85.93±2.08
1.85±0.19	2.44±0.35	11.9±1.20	0.27±0.02	97.69±0.64 ^{a)}	95.39±1.65 ^{a)}
1.68±0.37	2.10±0.40	13.5±1.58	0.26±0.02	93.53±0.94	95.20±0.34 ^{a)}
1.72±0.45 ^{a)}	2.67±0.06	13.2±1.33	0.27±0.01	94.28±1.79 ^{a)}	95.58±0.77 ^{a)}

degree of gelatinization, n=3)

貯蔵期間を7日間程度にした場合、未凍結の場合に比べて米飯塊の白濁および黄変の抑制、破断特性の維持が図れて良好であることが明らかになった。

(2) マイクロ波加熱解凍における米飯塊の温度挙動は、加熱時間と最終温度との到達時間の間に一定の傾向が認められなかった。これは、米飯塊の粒子形状が試料により不均一な集合体であることに起因すると推察した。

(3) マイクロ波加熱解凍後の水分含量は、米飯塊の中心部が低く、表層部が高くなる傾向が認められた。これは、急激な温度上昇により中心部の水蒸気圧が高くなって水分子が外側に拡散されるのに対して、表層部は包装により水分が保持されるためと考えられた。

(4) 自然解凍した米飯塊のデンプンの糊化度は、凍結温度、貯蔵温度および貯蔵期間に対して一定の傾向は認められないことから、冷凍米飯の品質劣化の主因ではないことが示唆された。

低温恒温恒湿機や色彩色差計などの使用に御便宜を図って頂きました岩手県工業技術センターおよび岩手大学地域共同研究センターに感謝致します。なお、成果の一部を日本食品科学工学会第47回大会（2000年3月、

東京）において口頭発表した。

文 献

- 1) 三浦 靖：化学装置，**42** (2)，27 (2000)。
- 2) FERRERO, C., MARTINO, M.N. and ZARITZKY, N.E. : *Int. J. Food Sci. Technol.*, **28**, 481 (1993)。
- 3) ELIASSON, A.-C. and KIM, H.R. : *J. Texture Studies*, **23**, 279 (1992)。
- 4) KIM, H.R. and ELIASSON, A.-C. : *J. Texture Studies*, **24**, 199 (1993)。
- 5) KIM, H.R., MUHRBECK, P. and ELIASSON, A.-C. : *J. Sci. Food Agric.*, **61**, 109 (1993)。
- 6) CHAN, W.S. and TOLEDO, R.T. : *J. Food Sci.*, **41**, 301 (1976)。
- 7) FERRERO, C., MARTINO, M.N. and ZARITZKY, N.E. : *Food Structure*, **11**, 237 (1992)。
- 8) NAVARRO, A.S., MARTINO, M.N. and ZARITZKY, N.E. : *J. Food Eng.*, **26**, 481 (1995)。
- 9) ZHENG, G.H. and SOSULSKI, F.W. : *J. Food Sci.*, **63**, 134 (1998)。
- 10) YUAN, R.C. and THOMPSON, D.B. : *Cereal Chem.*, **75**, 571 (1998)。
- 11) BAKER, L.A. and RAYAS-DUARTE, P. : *Cereal*

- Chem.*, **75**, 301 (1998).
- 12) BAKER, L.A. and RAYAS-DUARTE, P.: *Cereal Chem.*, **75**, 308 (1998).
- 13) 渋谷祥子・福岡博保: 家政誌, **25**, 461 (1974).
- 14) 松永暁子・貝沼圭二: 家政誌, **32**, 653 (1981).
- 15) 鈴木一成: 家政誌, **40**, 983 (1989).
- 16) 貝沼やす子: 家政誌, **46**, 539 (1995).
- 17) 貝沼やす子・江間章子: 家政誌, **38**, 567 (1987).
- 18) 丸山悦子・坂本 薫: 家政誌, **43**, 97 (1992).
- 19) 堤 忠一: 新・食品分析法, 日本食品科学工学会新・食品分析法編集委員会編 (光琳, 茨城), p. 6 (1996).
- 20) 貝沼圭二・松永暁子・板川正秀・小林昭一: 澱粉科学, **28**, 235 (1981).
- 21) 関千恵子・貝沼やす子: 家政誌, **33**, 228 (1982).
- 22) 肥後温子・島崎通夫: 家政誌, **41**, 733 (1990).
- 23) 久保田清: 食品物理化学, 食品の科学4, 松野隆一・矢野俊正編 (文永堂出版, 東京), p. 252 (1996).
- 24) 金谷昭子: 食品工業, **42** (22), 18 (1999).
- 25) HORIGANE, A. K., ENGELAAR, W. M. H. G., TOYOSHIMA, H., ONO, H., SAKAI, M., OKUBO, A. and NAGATA, T.: *J. Food Sci.*, **65**, 408 (2000).
- 26) 田島 眞・加藤万里子・飯塚敏恵: 日食工 **41**, 339 (1994).
- 27) 姫田正美: 農業および園芸, **71**, 567 (1996).
- 28) ROUSSET, S., PONS, B. and PILANDON, C.: *J. Texture Studies*, **26**, 119 (1995).
- 29) OKADOME, H., TOYOSHIMA, H. and OHTSUBO K.: *Cereal Chem.*, **76**, 855 (1999).
- 30) SITAKALIN, C. and MEULLENET, J-F.C.: *Cereal Chem.*, **77**, 501 (2000).
- 31) MEULLENET, J-F.C., CHAMPAGNE, E.T., BETT, K.L., MCCLUNG, A.M. and KAUFFMANN, D.: *Cereal Chem.*, **77**, 512 (2000).
- 32) 乙部和紀・内藤成弘・杉山純一・菊池祐二: 日食誌, **42**, 748 (1995).
- 33) KOHYAMA, K., OHTSUBO, K. and TOYOSHIMA, H.: *J. Texture Studies*, **29**, 101 (1998).
- 34) 堀内久弥・杉山純一: 食科工, **46**, 242 (1999).
- (平成13年3月7日受付, 平成13年7月17日受理)
-