

## 炊飯過程における米の糊化変化の非破壊・連続計測

羽倉義雄, 鈴木寛一

## A Non-destructive and Continuous Measurement of Gelatinization of Rice in Rice Cooking Process

Yoshio Hagura and Kanichi Suzuki

*Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University, 1-4-4 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8528*

A non-destructive and continuous method to measure gelatinization of rice samples in a rice-water system during rice cooking process was examined. An aluminum pot and a lid of a rice cooker were used as two electrode plates, and changes in dielectric properties (capacitance : C, and dielectric dissipation factor :  $\tan \delta$ ) of the samples in the rice cooking process were measured by a capacitance meter. Differential scanning calorimetry (DSC) was used to measure gelatinization enthalpy and to determine the degree of gelatinization. Dielectric loss was calculated from the dielectric properties, which changed as the rice cooking process proceeded. Thus, we defined the degree of gelatinization as the value obtained by integrating the dielectric loss with respect to time. The degree of gelatinization based on the dielectric properties was consistent with that based on the DSC. We concluded that the degree of gelatinization in the rice cooking process can be non-destructively and continuously determined by measuring the dielectric properties.

(Received Dec. 28, 2001 ; Accepted Mar. 15, 2002)

炊飯とは、乾物である米に適量の水を加えて加熱し、主成分のデンプンを糊化させ、約65%の水分を含む飯とすることである<sup>1)</sup>。炊飯過程における米の状態変化を捕捉する方法としては、米粒内にあるデンプンの糊化を測定する方法が一般的である。デンプンの糊化の測定には、光学的方法(複屈折, X線回折, 小角光散乱, フォトペーパーストグラム), 流動学的方法(アミログラム, 膨潤性, 溶解性, 粘弾性), 化学的方法(アミラーゼの消化性, 染色性, 化学反応性), 磁気的方法(核磁気共鳴吸収), 熱力学的方法(示差走査熱量測定)などがある<sup>2)3)</sup>。

上記の方法で炊飯過程における米の糊化度を測定する場合、一定時間毎に炊飯釜から米を数粒取り出し糊化度を測定する回分測定法か、数粒の米に水を加えてサンプル容器内で糊化度を測定する連続測定法のどちらかの方法を採用することになる。回分測定法では、糊化度の測

定中に炊飯が進行してしまうため、測定結果をもとに操作条件(火加減, 炊飯時間)を制御することは困難である。一方、連続測定では、サンプル容器内で起こる擬似的な炊飯過程における糊化度の連続的な測定は可能であるが、現実の炊飯釜内で起こる変化を捕捉することはできない。そこで、炊飯釜内に存在する米全体の糊化に伴う変化を連続的に測定することができれば、原料米(古米, 新米)の違いによる炊飯条件の制御やHACCPに対応した炊飯過程の定量的な加工履歴のモニタリング<sup>4)</sup>が可能になる。

ところで筆者らは、食品の誘電特性(電気容量)の測定により、食品の品質変化(揚油の劣化測定)や状態変化(凍結食品の温度測定)を定量的に計測できることを明らかにしてきた<sup>5)6)</sup>。誘電特性の測定には、試料内部の物理的変化を直接測定できる利点がある<sup>7)</sup>。さらに、誘

電特性の測定では、2枚の電極板間に試料を挿入することにより、試料内部の物理的変化を非破壊・連続的に測定することが可能である。また、測定周波数が低周波数領域 (kHz オーダー以下) では、比較的安価な装置により誘電特性を計測できるため、製造現場で利用することも容易である。

本研究では、炊飯釜を構成するアルミニウム製の鍋と蓋に2枚の電極板としての機能を持たせることにより、炊飯過程における米の誘電特性の変化を非破壊・連続的に測定できると考えた。本報告では、低周波数領域での米-水系試料の誘電特性の変化と糊化度との関係を明らかにし、誘電特性を利用した炊飯過程における米の糊化度の非破壊・連続測定の可能性を検討した。

## 実験方法

### 1. 誘電特性測定装置

本研究では、誘電特性として電気容量 (C) と誘電正接 ( $\tan \delta$ ) を測定した。炊飯過程における試料 (米および水) の誘電特性の変化を連続的に測定するために、市販の鍋と蓋を電極板兼炊飯釜とした (Fig. 1)。主電極として、フッ素樹脂コーティングされたアルミニウム製の鍋 (直径 26 cm, 深さ 5 cm) と PTFE (poly-tetrafluoroethylene) フィルム (厚さ 0.05 mm) で表面を絶縁したアルミニウム製の蓋 (直径 26 cm) を使用し、鍋と蓋で囲まれる空間内の誘電特性を測定した。また、蓋の上部に PTFE フィルム (厚さ 1 mm) を介してアルミニウム箔製のガード電極を設置し、電極端での漏洩電場の影響を除いた<sup>9)</sup>。同軸ケーブルを使用して鍋と蓋の金属部分をキャパシタンスメータ (日置電気株式会社, LCR3520) と接続し、誘電特性の測定を行った。このとき、同軸ケーブルのシールド部とガード電極をアースに接続した。測定周波数は、500 Hz, 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 50 kHz, 100 kHz とした。鍋内の試料温度の測定には、熱電対温度計 (T タイプ) を使用した。キャパシタンスメータおよび温度計をパーソナルコンピュータと接続し、電気容量、誘電正接および試料温度を1分ごとに記録した。

### 2. 炊飯操作

広島県産コシヒカリ (精米済み) を使用した。炊飯操作では、既報の炊飯要領<sup>1)</sup>に準拠した。炊飯量は米:水の重量比が1:1.5となる米160gと蒸留水240gとした。また、水浸漬の時間は30分間とした。加熱には、ガスコンロを使用し、常に一定の火力 (中火) で加熱を行い、加熱開始後16分で消火し、その後30分まで (14分間) 蒸らしを行った。本研究では、ガスコンロによる加

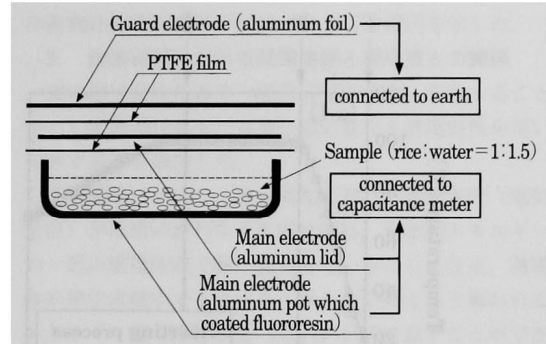


Fig. 1 Schematic diagram of a device for measuring dielectric properties

熱の開始時刻を時間0とし、その後の時間経過を分単位で表すことにした。

### 3. 糊化エンタルピーの測定

加熱開始から蒸らし終了までの炊飯過程における米の糊化の程度を把握するために、示差走査熱量計 (DSC; セイコー電子工業株式会社, SSC5200H) を使用し米の糊化エンタルピーを測定した。DSCによる米デンプンの糊化熱量測定では、DSC曲線とその基線と囲まれる部分の面積 (吸熱ピーク面積) が糊化熱量に相当する<sup>9)</sup>。

糊化エンタルピーの測定では、電気容量測定と同一条件で炊飯操作を行い、任意の時間ごとに米1粒をピンセットで取り出し、米重量の1.5倍量の蒸留水を加え、すばやくDSC測定用密閉型サンプルパン (銀製) に封入した。これを0°Cの氷水で急冷し、糊化の進行を止めた後、糊化エンタルピーの測定を行った。リファレンスには、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ を封入したサンプルパンを使用した。昇温速度は1°C/min、走査温度範囲は2.5~130°Cとした。

## 結果および考察

### 1. 炊飯過程における温度変化と電気容量変化

水 (蒸留水 240 g) のみを加熱したときの水の温度変化と電気容量変化を Fig. 2 (a) に示した。加熱開始6分後に沸騰が始まり、16分後に消火した。同時に測定した電気容量には、大きな変化は現れなかった。一般に、水の誘電率は温度の上昇に伴い僅かに減少することから<sup>10)</sup>、電気容量も同様に減少すると予想される。また、水の蒸発も電気容量を減少させる要因になる。しかし、本研究では、電気容量を測定する部分である鍋と蓋で囲まれる空間に対して、水の体積が圧倒的に少ないことから (水:空間=1:10)、水の温度変化や水の蒸発に伴う電気容量の変化が現れなかったと考えられる。

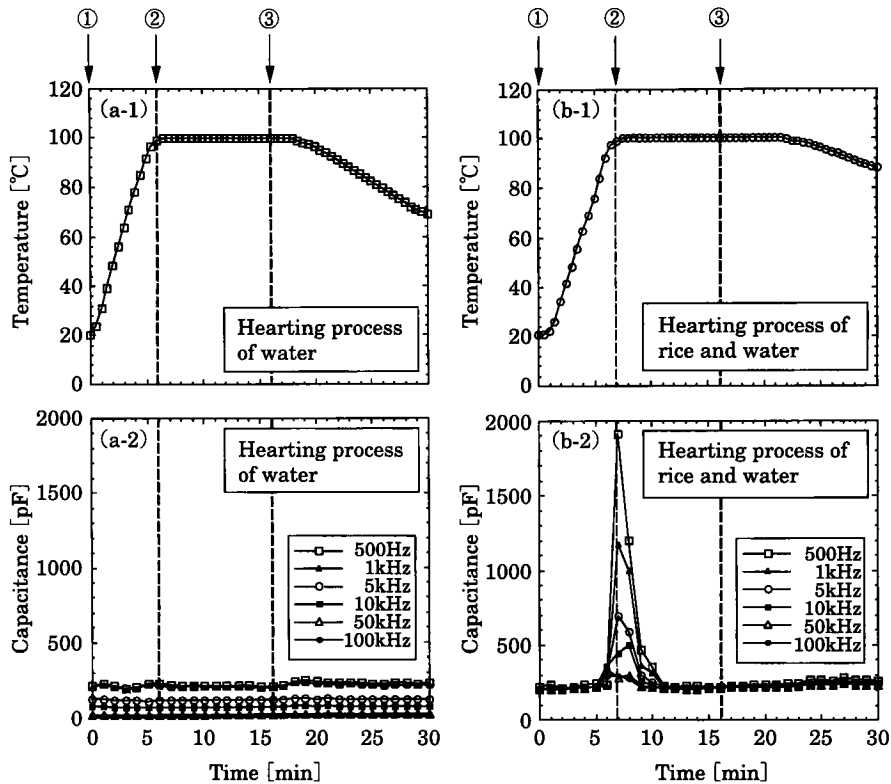


Fig. 2 Changes in temperature and capacitance during the rice cooking process

- ① : The start time of heating.  
 ② : The start time of boiling.  
 ③ : The end time of heating.

炊飯過程における試料(米および水)の温度変化を Fig. 2 (b-1) に示した。炊飯過程では、加熱開始7分後に沸騰が始まり、16分後に消火し、30分後まで蒸らしを行った。同時に測定した電気容量の変化を Fig. 2 (b-2) に示した。電気容量は5分後から急激に増加し、沸騰が始まる7分付近でピークを示し、11分以降は加熱前の水準に戻った。また、電気容量の最大値は測定周波数が低いほど大きかった。しかし、5分以前と11分以降では、測定周波数には関係なくほぼ同じ電気容量を示した。

Fig. 2 (b-1) より、電気容量の増加が始まる加熱開始5分後の試料温度は約75°Cである。これは、既往の研究における米デンプンの糊化開始温度(68~82°C)<sup>11)</sup>とほぼ一致する。水のみでは電気容量が変化せず、米と水が同時の存在する場合のみ電気容量が変化することから、Fig. 2 (b-2) における電気容量の変化は、米の炊飯過程で生じる変化、特に米デンプンの糊化に関する変化で

あると考えられる。

## 2. 炊飯過程における糊化エンタルピーの変化

炊飯過程における米の糊化エンタルピーの測定結果を Fig. 3 に示した。未加熱の米の糊化エンタルピーは約8 kJ/kgであった。糊化エンタルピーは、加熱開始後5分まではほとんど変化せず、5~7分間で急激に減少した。16分以降の蒸らし期間中も糊化エンタルピーの減少が見られ、30分後に糊化エンタルピーが0 kJ/kgになった。

Fig. 3 において、加熱開始0分の状態(糊化エンタルピー: 8 kJ/kg)を糊化度0%(未炊飯の状態)とし、30分後の状態(糊化エンタルピー: 0 kJ/kg)を糊化度100%(炊飯終了の状態)と定義し<sup>12)</sup>、糊化度で炊飯過程を表した結果を Fig. 4 (a1) に示した。糊化エンタルピーで定義した米の糊化度の変化は、沸騰直前から急激に糊化が始まり、7分後に50%のデンプンが糊化し、そ

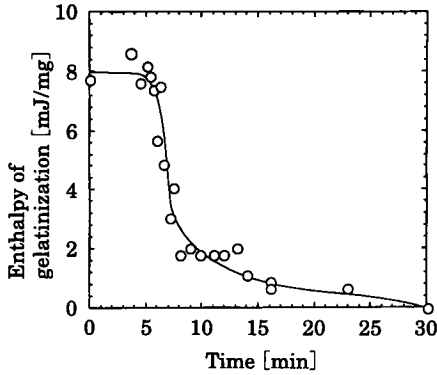


Fig. 3 Change in gelatinization enthalpy during the rice cooking process

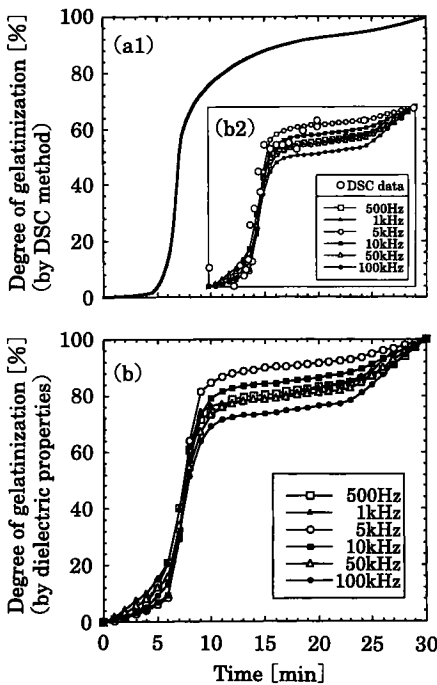


Fig. 4 Change in the degree of gelatinization during the rice cooking process

- (a1): Degree of gelatinization measured by DSC measurement.
- (a2): Relationship between DSC measurement and dielectric properties measurement.
- (b): Degree of gelatinization measured by dielectric properties measurement.

の後糊化速度が緩やかに減少して行く傾向を示した。

3. 炊飯過程における誘電体損と糊化度との関係

米の糊化温度付近で、電気容量が大きく変化することから、炊飯過程における糊化度の変化を誘電特性を用いて表す方法を検討した。

交流電場において、電界強度に対して電束密度（電気変位）が位相の遅れを示す場合には、電気的エネルギーの一部が誘電体内で熱に変わっていることになる。誘電体の単位体積中で1サイクル当たりの熱として奪われるエネルギー損（誘電体損） $w_{loss}$ は(1)式で表すことができる<sup>13)</sup>。

$$w_{loss} = \pi \epsilon' \epsilon_0 E_m^2 \tan \delta [J/m^3] \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\epsilon' [-]$  は比誘電率、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率 ( $8.854 \times 10^{-12} [F/m]$ )、 $E_m [V/m]$  は電界強度、 $\tan \delta [-]$  は誘電正接である。交流電場での誘電体損は、誘電体（媒体）の内部摩擦（粘性抵抗）に抗して、双極子の回転、電子分極、イオンの移動などが起こるために生じるエネルギー損失と考えられている<sup>14)</sup>。本研究では、米-水系試料の炊飯によるデンプンの粘性変化が誘電体損に現れると考えた。(1)式において試料の体積  $V [m^3]$  と交流電場の周波数  $f [Hz]$  が決まれば、単位時間当たりの誘電体損  $w$  は(2)式のようなになる。

$$w = f \pi \epsilon' \epsilon_0 E_m^2 \tan \delta V [J/s] \dots\dots\dots (2)$$

(2)式の右辺において、比誘電率  $\epsilon'$  と誘電正接  $\tan \delta$  以外は全て定数であり、既知の値である。また、比誘電率は  $\epsilon' = C/C_0$  より求めることができる。ここで、 $C$  は実測した試料の電気容量、 $C_0$  は試料を入れない状態で測定した鍋と蓋の間にできる空間の電気容量である。さらに、誘電正接は電気容量の測定と同時に得られる実測値である。従って、既知の定数及び実測値を用いて、炊飯過程の米-水系試料の誘電体損を求めることができる。ところで、(2)式では誘電体損が単位時間あたりのエネルギー損失として表される (Fig. 5 (a))。そこで、誘電体損を時間で積分すると、(3)式で表されるようにエネルギー損失の累積になる (Fig. 5 (b))。

$$W_i = \int w dt [J] \dots\dots\dots (3)$$

本研究では、炊飯過程のある時刻における誘電体損が米の糊化速度を表し、誘電体損の時間積分が糊化度の変化を表すと考えた。そこで、加熱開始0分における誘電体損の時間積分を糊化度0%とし、30分後の誘電体損の時間積分を糊化度100%と定義した (Fig. 5 (b))。誘電体損の時間積分を用いて糊化度の変化を表した結果を Fig. 4 (b) に示した。

Fig. 4 (b) では、測定周波数により糊化度の絶対値は

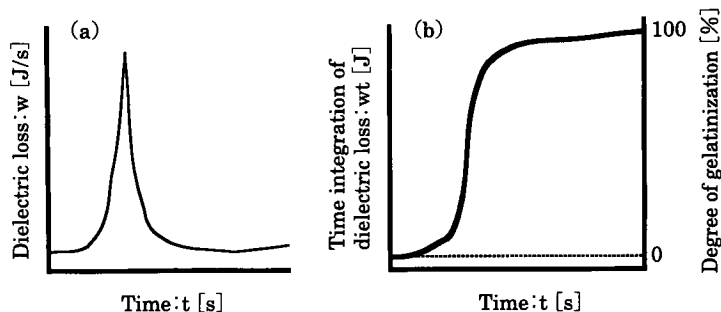


Fig. 5 Method for obtaining the degree of gelatinization using dielectric loss

異なっているが、全体的な曲線の形状は DSC 測定により得られた糊化度の変化 (Fig. 4 (a)) と一致していた。測定周波数により糊化度の絶対値が異なる理由は明確ではないが、生体高分子 (タンパク質)-水系試料の誘電緩和が 100 kHz~10 MHz で起こる<sup>15)</sup> ことから、米 (主にデンプン)-水系試料の誘電緩和による影響が現れていると考えられる。

Fig. 4 (a2) に DSC 測定により得られた糊化度の実測値と誘電体損の時間積分から得られた糊化度の関係をプロットした。DSC 測定により得られた糊化度の実測値にはバラツキがあるが、概ね Fig. 4 (b) と一致している。誘電体損の時間積分から得られた糊化度 (Fig. 4 (b)) と DSC 測定により得られた糊化度 (Fig. 4 (a1)) の相関係数は、0.983 (500 Hz), 0.976 (1 kHz), 0.958 (5 kHz), 0.959 (10 kHz), 0.968 (50 kHz), 0.958 (100 kHz) であった。本研究では、500 Hz の測定結果を用いて算出した糊化度が DSC 測定により得られた糊化度と最も良い相関を示した。

本研究では、炊飯釜を構成するアルミニウム製の鍋と蓋に 2 枚の電極板としての機能を持たせ、炊飯過程における米の誘電特性の変化を測定した。その結果、誘電特性の時間変化 (誘電体損の時間積分) を用いることにより、米の炊飯過程の非破壊・連続測定の可能性を示すことができた。これは、原料米 (古米、新米) の違いによる炊飯条件の制御や炊飯過程の定量的なモニタリング等に利用できる可能性がある。さらに、この方法では、デンプン-水系試料の糊化に伴う誘電特性の変化を計測していることから、デンプン含有食品全般に対して応用できる可能性が考えられる。

#### 要 約

アルミニウム製の鍋と蓋に 2 枚の電極板としての機能

を持たせ、炊飯過程における米-水系試料の誘電特性の変化を低周波領域で測定し、以下の結果を得た。

(1) 炊飯過程における電気容量の変化は、加熱開始 5 分後から急激に増加し、沸騰が始まる 7 分付近でピークを示し、11 分以降は加熱前の水準に戻った。電気容量の増加が始まった時点の試料温度は米デンプンの糊化開始温度とほぼ一致していた。

(2) DSC による米の糊化度の変化は、沸騰直前から急激に糊化が始まり、加熱開始 7 分後に 50% のデンプンが糊化し、その後糊化速度が緩やかに減少して行く傾向を示した。

(3) 実測した電気容量と誘電正接から誘電体損を求め、これを時間で積分し新たな糊化度を定義したところ、DSC 測定により得られた糊化度と良好に一致した。

(4) 以上の結果より、誘電特性を利用した炊飯過程の米の糊化度の非破壊・連続測定の可能性が示唆された。

#### 文 献

- 調理科学研究会編, 調理科学, 光生館 (東京), p. 245 (1984).
- 西成勝好, 矢野俊正編, 食品ハイドロコロイドの科学, 朝倉書店 (東京), p. 141 (1990).
- 野口 駿, 食品と水の科学, 幸書房 (東京), p. 149 (1992).
- 日佐和夫, HACCP がよくわかる本, PHP 研究所 (東京), p. 118 (1998).
- Inoue, C., Hagura, Y., Ishikawa, M. and Suzuki, K., J. Food Sci., in press.
- 成宮正興, 羽倉義雄, 日本冷凍空調学会論文集, 16, 23 (1999).
- H. Frohlich, Theory of Dielectrics (2ed Ed.), Clarendon Press (Oxford), p. 104 (1960).
- 日本化学会編, 実験化学講座 9 電・磁気 (第 4 版), 丸善 (東京), p. 231 (1991).

- 
- 9) 日本熱測定学会編, 新熱分析の基礎と応用, リアライズ社 (東京), p. 196 (1989).
  - 10) 日本化学会編, 化学便覧基礎編第 I 分冊 (改定 4 版), 丸善 (東京), p. 341 (1993).
  - 11) Y.H. Roos, Phase Transitions in Food, Academic Press (San Diego), p. 129 (1995).
  - 12) 松永暁子, 石田信昭, 貝沼圭二, 日食工誌, **32**, 797 (1985).
  - 13) 内野研二, セラミストのための電気物性入門 (第 2 版), 内田老鶴圃 (東京), p. 69 (1992).
  - 14) 金丸 競, 高分子電気物性, 共立出版 (東京), p. 32 (1981).
  - 15) 上平 恒, 逢坂 昭, 生体系の水, 講談社 (東京), p. 80 (1989).
- (平成 13 年 12 月 28 日受付, 平成 14 年 3 月 15 日受理)
-