

【報 文】

# シミュレーションによるジャガイモの最適加熱時間に及ぼす形状の影響

## Simulation Study of Effects of Size and Shape on the Optimum Cooking Time for Potatoes

香西みどり\*

(Midori Kasai)

中村文子\*\*

(Fumiko Nakamura)

畠江敬子\*

(Keiko Hatae)

島田淳子\*\*\*

(Atsuko Shimada)

A computer simulation was used to carry out a quantitative study of the effects of the size and shape of a sample on the optimum cooking time at 99.5°C. The softening ratio was evaluated on the basis of a thermal conduction analysis combined with the softening rate constant. The optimum cooking time, which is defined as the time required for the optimum softening ratio, was obtained at the center of various differently shaped samples. When the sample volume was kept constant, the optimum cooking time was in the order of sphere > cube > cylinder or rectangular brick > slab. In the case of constant volume, the larger the surface area, the shorter the optimum cooking time. The increase in optimum cooking time of the slab sample with increasing volume was remarkably small due to the low ratio of volume to surface area. It has been quantitatively proved that a slab is best for a short optimum cooking time and for efficient control of hardness during food processing.

**キーワード：**シミュレーション simulation；軟化 softening；温度 temperature；最適加熱時間 optimum cooking time；最適軟化率 optimum softening ratio；ジャガイモ potato

食品の最適な加熱条件を予測し、仕上がり状態を制御することは調理加工における重要な課題である。既報において著者ら(香西と島田 1985)は最適な可食状態になるまでの加熱時間、すなわち最適加熱時間の予測をジャガイモの立方体試料について行った。本予測法は熱伝導解析による試料内部温度の予測と軟化の速度定数、さらに官能評価による最適軟化率を組み合わせたものである。試料の形状が異なると加熱中の温度履歴や最適加熱時間が異なってくる。本研究ではゆで加熱における最適加熱時間に及ぼす試料の形状の影響について検討した。

野菜は加熱により硬化と軟化が同時に起こっているが、高温領域では比較的その影響は小さい(Kasai et al., 1994)。高温域での軟化は一次またはn次の速度式

に近似され、種々の野菜の軟化の速度定数が報告されている(Kubota et al., 1978, 久保田他 1980, Huang et al., 1983, Harada et al., 1985, 岡崎他 1991)。著者ら(香西と島田 1985, 松裏他 1989, 香西他 1992, 香西他 1998)は種々の加熱条件に対応した野菜の調理過程を予測するために軟化に着目した計算機シミュレーションを行い、これと加熱の目的を数値化した最適軟化率を組み合わせて最適加熱時間の予測を行ってきた。さらに実用的な観点から立方体試料の沸騰水中での最適加熱時間を大きさの2次関数で近似的に表した。実際の調理では様々な形の食品を扱うことが多い。これまで形による最適加熱時間の違いは経験的にしか知られておらず、この問題を数量的に比較検討した研究はみられない。

そこで、本研究ではジャガイモについて形が球、立方体、直方体、円柱および平板状の計算モデルを設定し、加熱中の温度履歴を熱伝導解析により、また軟化過程の予測を軟化の速度定数より行い、最適加熱時間に及ぼす形状の影響を数量的に明らかにすること目的とした。

\* お茶の水女子大学生活科学部  
(School of Human Life and Environmental Science, Ochanomizu University)

\*\* 東京電力株式会社  
(Tokyo Electric Company)

\*\*\* 昭和女子大学大学院  
(Graduate School, Showa Woman's University)

## シミュレーションによるジャガイモの最適加熱時間に及ぼす形状の影響

## 方 法

## 1. 热伝導解析

試料の形が直方体、円柱および球の場合の熱伝導微分方程式およびその解析解は以下の式(1)~(9)のように表される (Carslow, H. S. et al., 1959)。本研究では試料の内部温度をそれぞれの解析解より求めた。計算値の妥当性については以下のように考えた。既報(香西と島田 1985)において3次元の熱伝導方程式の解(式(2))を用いて計算した1cm角のジャガイモの中心温度と実測値はほぼ一致することを確認した。また前報(香西他 1998)に図示したように水からゆでるときの3cm角試料の中心温度変化を差分法による3次元の熱伝導解析により計算した結果は実測値とほぼ一致した。いずれの場合も計算による内部温度変化から予測される最適加熱時間が実験値とほぼ一致することを官能検査により確認しており、これらの結果に基づいて本研究では球および円柱についても計算による値を用いることとした。

## (1) 直方体の場合

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) \quad (1)$$

ここで  $T$  は温度 (K),  $t$  は加熱時間 (s),  $X, Y, Z$  は中心からの距離 (m),  $\alpha$  は熱拡散率 ( $m^2/s$ ) で  $\lambda/(C_p\rho)$  で与えられる。 $\lambda$  は熱伝導率 [ $W/(m K)$ ],  $C_p$  は比熱 [ $J/(kg K)$ ],  $\rho$  は密度 ( $kg/m^3$ ) である。試料表面の液膜の伝熱抵抗が試料内部の伝熱抵抗に比較して無視できる場合には式(1)は次の初期、境界条件で解くと式(2)が得られる。

## 初期条件

$$t=0, -A \leq X \leq A, -B \leq Y \leq B, \\ -C \leq Z \leq C : T = T_0$$

## 境界条件

$$t>0, \begin{cases} X=\pm A, -B \leq Y \leq B, \\ -C \leq Z \leq C : T = T_1 \\ -A \leq X \leq A, Y=\pm B, \\ -C \leq Z \leq C : T = T_1 \\ -A \leq X \leq A, -B \leq Y \leq B, \\ Z=\pm C : T = T_1 \end{cases}$$

$$\frac{T_1-T}{T_1-T_0} = 8 \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{(-1)^{m+n+p}}{\left(m+\frac{1}{2}\right)\left(n+\frac{1}{2}\right)\left(p+\frac{1}{2}\right)\pi^3} \\ \times \exp \left[ -\left( \frac{\left(m+\frac{1}{2}\right)^2}{A^2} + \frac{\left(n+\frac{1}{2}\right)^2}{B^2} + \frac{\left(p+\frac{1}{2}\right)^2}{C^2} \right) \pi^2 \alpha t \right] \quad (2)$$

ここで  $A, B, C$  は一辺の長さの  $1/2(m)$ ,  $T_1$  は周囲温度 (K),  $T_0$  は試料の初期温度 (K) である。また収束回数  $m, n, p$  は各々 10 回とした。

## (2) 円柱の場合

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial l^2} \right) \quad (3)$$

ここで  $T$  は温度 (K),  $t$  は時間 (s),  $r$  は円の中心からの距離 (m),  $l$  は軸方向の中心からの距離 (m),  $\alpha$  は熱拡散率 ( $m^2/s$ ) である。有限円柱の解は無限平板と無限円柱の解の積で表され、式(3)を次の初期、境界条件を用いて解くと式(5)が得られる。

初期条件  $t=0, 0 \leq r \leq R, -L \leq l \leq L : T = T_0$

$$r=R, -L \leq l \leq L : T = T_1$$

$$\text{境界条件 } t>0, \begin{cases} r=0, -L \leq l \leq L : \frac{\partial T}{\partial r}=0 \\ 0 \leq r \leq R, l=\pm L : T = T_1 \end{cases}$$

$$\left( \frac{T_1-T}{T_1-T_0} \right)_{\text{円柱}} = \left( \frac{T_1-T}{T_1-T_0} \right)_{\text{平板}} \times \left( \frac{T_1-T}{T_1-T_0} \right)_{\text{円柱}} \quad (4)$$

$$\frac{T_1-T}{T_1-T_0} = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\left(n+\frac{1}{2}\right)\pi} \exp \left[ -\left( \frac{\left(n+\frac{1}{2}\right)^2}{L^2} \right) \pi^2 \alpha t \right] \\ \times \cos \frac{\left(n+\frac{1}{2}\right)}{L} \pi l \times 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left( -\frac{\beta_n^2 \alpha t}{R^2} \right) \frac{J_0(r\beta_n)}{\beta_n J_1(R\beta_n)} \quad (5)$$

ここで  $R$  は半径 (m),  $L$  は無限平板の厚さの  $1/2$  の長さ (m) である。 $T_1$  は周囲温度 (K),  $T_0$  は試料の初期温度 (K) である。 $\pm \beta_n, n=1, 2, \dots$  は次式で表される 0 次のベッセル関数の根である。

$$J_0(\beta) = 0 \quad (6)$$

## (3) 球の場合

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (7)$$

ここで  $T$  は温度 (K),  $t$  は時間 (s),  $r$  は中心からの距離 (m),  $\alpha$  は熱拡散率 ( $m^2/s$ ) である。式(7)を次の初期、境界条件を用いて解くと式(8) (9)が得られる。

初期条件  $t=0, 0 \leq r \leq R : T = T_0$

$$\text{境界条件 } t>0, \begin{cases} r=R : T = T_1 \\ r=0 : \frac{\partial T}{\partial r}=0 \end{cases}$$

$r=0$  のとき

$$\frac{T_1-T}{T_1-T_0} = -2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp \left( -\frac{\alpha n^2 \pi^2 t}{R^2} \right) \quad (8)$$

$r \neq 0$  のとき

$$\frac{T_1 - T}{T_1 - T_0} = -2 \frac{R}{\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin \frac{n\pi r}{R} \times \exp \left( -\frac{an^2\pi^2 t}{R^2} \right) \quad (9)$$

ここで  $R$  は試料の半径 (m),  $T_1$  は周囲温度 (K),  $T_0$  は試料の初期温度 (K) である。

本研究では各種形状試料の中心温度は式 (2) (5) (8) (9) を用いて計算した。計算には文献 (山田 1970) によりジャガイモの密度  $1070 \text{ kg/m}^3$ , 熱伝導率  $0.512 \text{ W/(m K)}$ , 比熱  $3270 \text{ J/(kg K)}$  の値を用いて算出される熱拡散率  $1.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (久保田他 1981) を用いた。

## 2. 最適加熱時間の計算

既報 (香西と島田 1985) に準じ、以下の方法で各種形状試料の加熱による軟化率の経時変化および最適加熱時間の算出を行った。

まず、 $99.5^\circ\text{C}$  で加熱したときの各種形状試料の中心温度の経時変化を計算により求め、各温度における軟化の速度定数を次のアレニウスの式により算出する。

$$k = A \exp(-E/RT) \quad (10)$$

ここで  $k$  は軟化を一次の速度式に近似させたときの速度定数 ( $\text{s}^{-1}$ ),  $A$  は頻度因子 ( $\text{s}^{-1}$ ),  $E$  は活性化エネルギー ( $\text{J/mol}$ ),  $R$  は気体定数  $8.314 \text{ J/(mol K)}$ ,  $T$  は絶対温度 (K) である。本研究ではジャガイモの  $A$  として  $1.67 \times 10^{18} \text{ s}^{-1}$ ,  $E$  として  $1.45 \times 10^5 \text{ J/mol}$  (松裏他 1989) の値を用いた。次に  $99.5^\circ\text{C}$  で加熱したときの軟化率  $x$  の経時変化を次式により求める。

$$x = 1 - \exp(-kt) \quad (11)$$

$x$  は次式で定義される硬さの無次元値である。

$$x = \frac{|y_0 - y|}{|y_0 - y_e|} \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (12)$$

ここで  $y_0$  は硬さの初期値 (N),  $y$  は時間  $t$  における硬さ,  $y_e$  は硬さの平衡値 (N) である。なお、式 (11) において  $kt$  の  $k$  は時間とともに変化するので数値積分できないため時間区分を 1 秒として図積分を行った。既報 (香西と島田 1985) に準じ軟化率が最適軟化率の値である 0.9000 になった時間を最適加熱時間とした。

計算はプログラムを作成し、ワークステーション (Sun spark work station) を用いて行った。

## 3. 官能検査

予測した最適加熱時間で加熱した試料の煮熟度を 5 段階評点法 (-2: 煮熟不足, -1: やや煮熟不足, 0: 適度, +1: やや煮熟しそぎ, +2: 煮熟しそぎ) で評価した。パネルはお茶の水女子大学調理学研究室員 10 名とした。

## 結果および考察

### 1. 一定体積における各種形状試料の最適加熱時間

最適加熱時間は食品の形や大きさに影響され、大きさは重量や体積に反映される。はじめに最適加熱時間に及ぼす形の影響を明らかにするために体積が一定の場合について検討した。ここで体積を用いたのはそれぞれの形における大きさを設定するためであり、体積に比重を乗じると重量に換算できる。ジャガイモの比

Table 1. Sizes and shapes of samples with a volume of  $20 \text{ cm}^3$

Shape	Side ratio	Side length (cm)
Sphere		3.37(d)
Cube	1 : 1 : 1	$2.71 \times 2.71 \times 2.71$
Rectangular block (1)	2 : 2 : 1	$3.42 \times 3.42 \times 1.71$
Rectangular block (2)	1 : 1 : 4	$1.71 \times 1.71 \times 6.84$
Cylinder (1)	2(d) : 1(h)	$3.71 \times 1.85$
Cylinder (2)	1(d) : 4(h)	$1.85 \times 7.41$
Slab	10 : 10 : 1	$5.85 \times 5.85 \times 0.59$

d: Diameter

h: Height

## シミュレーションによるジャガイモの最適加熱時間に及ぼす形状の影響

重は1.07~1.14の範囲(二国二郎編 1961)にある。

Table 1に体積を $20\text{cm}^3$ とした時の球、立方体、辺の比が2:2:1の直方体(平)および1:1:4の直方体(棒)、直径と高さの比が2:1の円柱(平)および1:4の円柱(棒)、辺の比が10:10:1の平板の大きさおよび中心からの最短距離を示した。

Fig. 1に各試料を $99.5^\circ\text{C}$ で加熱した場合の試料中心部の温度を、Fig. 2に同じく軟化率の経時変化を示した。式(10)に示したように軟化速度は温度が高いほど大きいので、Fig. 1およびFig. 2において各種形状を比較すると当然温度上昇の速い順に軟化の進行が速くなっている。ただし、軟化が顕著におこるには $80^\circ\text{C}$ 以上の温度が必要である(香西と島田 1985)ため、Fig.

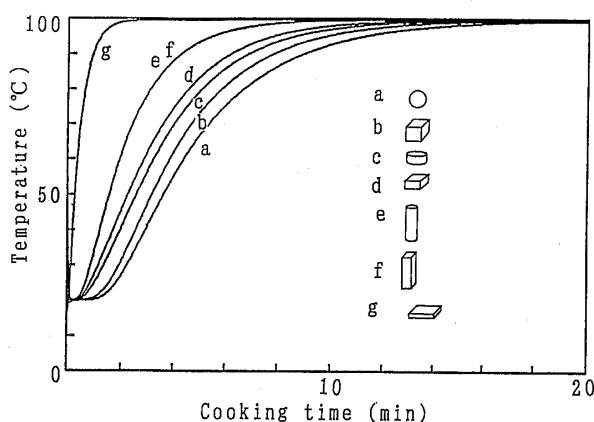


Fig. 1. Variation of the temperature at the center for various shaped samples with a volume of  $20\text{cm}^3$  during cooking at  $99.5^\circ\text{C}$

The size of each shaped sample is shown in Table 1.

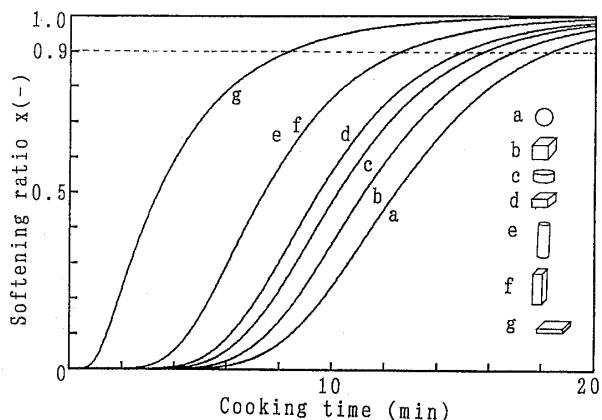


Fig. 2. Variation of the softening ratio at the center for various shaped samples with a volume of  $20\text{cm}^3$  during cooking at  $99.5^\circ\text{C}$

The size of each shaped sample is shown in Table 1.

2に示した軟化率の変化はFig. 1に示した温度上昇に遅れて起こっている。また加熱時間とともに形状間に温度差がほとんどなくなってからも軟化率には差がみられ、最適加熱時間に及ぼす形状の影響を明らかにするには温度上昇の違いだけでなく沸騰継続期の軟化の予測が重要であることがわかる。

Fig. 2より各試料について最適軟化率0.9に達するまでの時間、すなわち最適加熱時間を読みとり、短い順に並べると平板(8.4min)>直方体(棒)=円柱(棒)(12.9min)>直方体(平)(15.2min)>円柱(平)(16.1min)>立方体(17.6min)>球(18.7min)となった。このように同一体積でも最適加熱時間は形状によって大きく異なり、最短の平板では最長の球の45%であった。ここで直方体と円柱についてみると、直方体(棒)と円柱(棒)(それぞれFig. 2ではeとf)ではほぼ同等、直方体(平)は円柱(平)(それぞれFig. 2ではdとc)より最適加熱時間が短くなっている、形によって傾向が異なっていた。

次に形状によるジャガイモの最適加熱時間の違いが何に由来するかを以下に検討した。本研究では最適軟化率に達するまでを最適加熱時間としており、式(10)に示したように軟化の速度定数は温度の関数で表される。試料内部の温度上昇は伝導伝熱であるから中心部の温度上昇には最短距離と各方向からの距離が関係する。はじめにTable 1に示した各計算モデルの中心からの最短距離と最適加熱時間の関係を調べた。その結果、直方体では平たい形と棒状の形で最短距離が等しいにも関わらずFig. 2に示したように棒状の直方体(f)の方が平たい直方体(d)よりも最適加熱時間が短

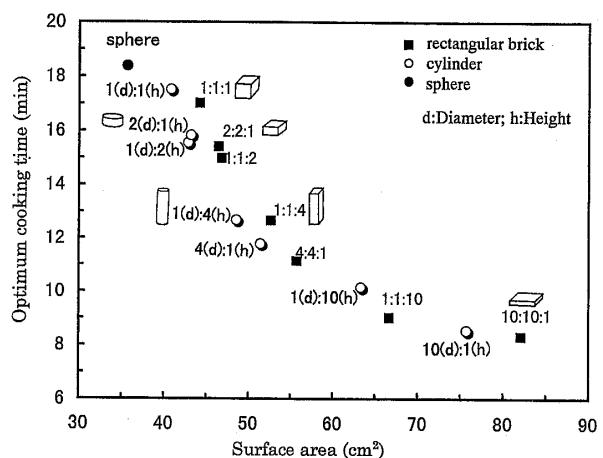


Fig. 3. Relation between surface area and the optimum cooking time for various shaped samples with a volume of  $20\text{cm}^3$  in cooking at  $99.5^\circ\text{C}$

かかった。円柱についても全く同様の傾向があり、最短距離だけでは最適加熱時間の長短を説明できなかった。そこで各方向からの距離が影響すると考え、球、直方体、円柱という形の違いを共通の尺度で比較するために表面積を用いることとし、Fig. 3 に表面積と最適加熱時間の関係を図示した。図には Table 1 に示した計算モデルの他に直方体における辺の比と円柱における直径対高さの比が種々異なる場合の計算結果も併せて示してある。

Fig. 3 に示したように、様々な形状の試料の最適加熱時間は表面積が大きいほど短くなる傾向にあった。このことから形状の異なる試料の最適加熱時間の違いは中心からの最短距離だけでなく各方向からの距離の相違に由来し、各方向からの距離の長短は表面積の大小に反映されるといえる。

ここで、辺の比が 1:1:4 の直方体(棒)と直径と厚さの比が 1:4 の円柱(棒)では表面積が直方体の方が大きいにも関わらず、最適加熱時間がほぼ等しいという例外的な関係にある。そこで直方体および円柱の細長い形の温度上昇には表面積以外の要因も関与していると考え、最短距離を有する面の形に注目した。最短距離を有する面は直方体(棒)および円柱(棒)では正方形または円である。Table 1 に示した円柱(棒)の円の大きさ(直径 1.85 cm)は直方体(棒)の正方形の面の内接円(直径 1.71 cm)と外接円(直径 2.41 cm)の間にあり、円と正方形を重ねたとき、正方形がはみだす領域の方が円がはみだす部分より大きい。従ってこの場合は直方体の方が円柱より中心部の温度上昇に不利な形であると考えられる。

次に直方体および円柱では平たいか棒状かが最適加熱時間に大きく影響していることから、直方体の辺の

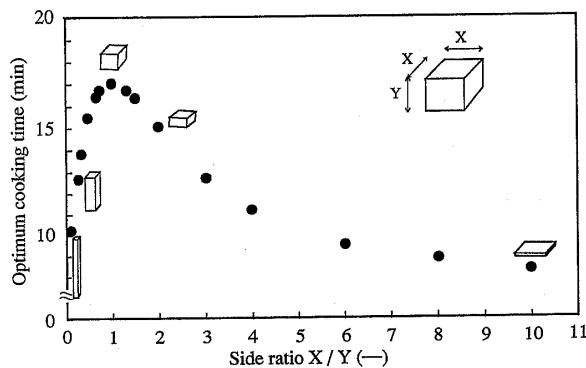


Fig. 4. Relation between side ratio and the optimum cooking time for the rectangular brick samples with a volume of 20 cm<sup>3</sup> in cooking at 99.5°C

比と最適加熱時間との関係を調べた。その結果、Fig. 4 に示したように体積一定のときは 3 辺の比が 1:1:1 に近いほど加熱時間が長く、また平たい形になるほど加熱時間の変化が緩やかになり、最も加熱時間が短いのは 10:10:1 のときであった。10:10:1 の辺の比は一般に無限平板にみなせる形であるが 6:6:1 における最適加熱時間はこれにかなり近いものである。本結果より厚さに対して 5~6 倍以上の面を持つ平板であればその体積においてほぼ最短の時間で加熱処理できるといえる。

## 2. 各種形状の最適加熱時間の体積依存性

次にそれぞれの形について最適加熱時間に及ぼす大きさの影響について検討した。実際には相似形のまま体積を増加させ、それぞの形における最適加熱時間の体積依存性を調べた。

その結果、Fig. 5 に示したように平板以外の形では体積の増加とともに最適加熱時間が増加した。また、球や立方体のように体積が一定の場合に加熱時間の長いものほど体積増加に伴う加熱時間の増加割合が大きくなつた。この理由として相似形の場合、大きさが面積には 2 乗で、また体積や重さには 3 乗できいてくることが影響していると考えられた。そこで体積および表面積に及ぼす大きさの影響を比較するために、立方体と直方体(平)(棒)および平板について体積と表面積を立方体の一辺の長さを L として表し、さらに両者の比をとってみた。この比が小さいほど体積の増加に対して表面積の増加が急激であることを意味し、その結果最適加熱時間の増加が抑制されることになる。計算の結果、立方体では体積/表面積の比は 0.166 L、直方体(平)では 0.155 L、直方体(棒)では 0.142 L、平板では 0.089 L となった。他の形に比べて平板はこの比が非常に小さいことが特徴であり、平板の最適加熱時間は相似形であれば体積あるいは重量にあまり依

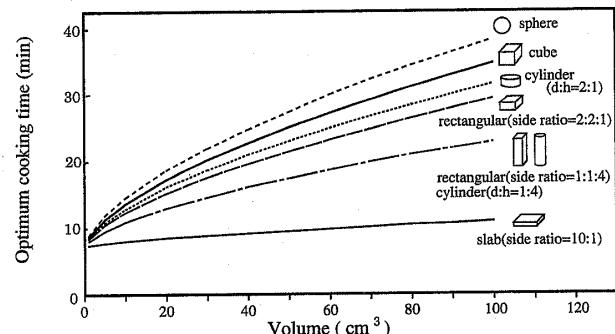


Fig. 5. Volume dependence of the optimum cooking time at 99.5°C for various shaped samples  
d: Diameter h: Height

## シミュレーションによるジャガイモの最適加熱時間に及ぼす形状の影響

存しないといえる。このことは調理加工において平板状の試料は最適加熱時間が短いだけでなく、大量に加熱処理したいときに制御しやすい形でもあることを示している。

## 3. 球状試料の温度および軟化率分布

試料が大きいほど試料中心部と表面部の温度や軟化率の差が大きい、すなわち分布が大きいことが予想される。しかし、時間とともに変化するこれらの分布状態を実測することは非常に困難である。そこで、加熱

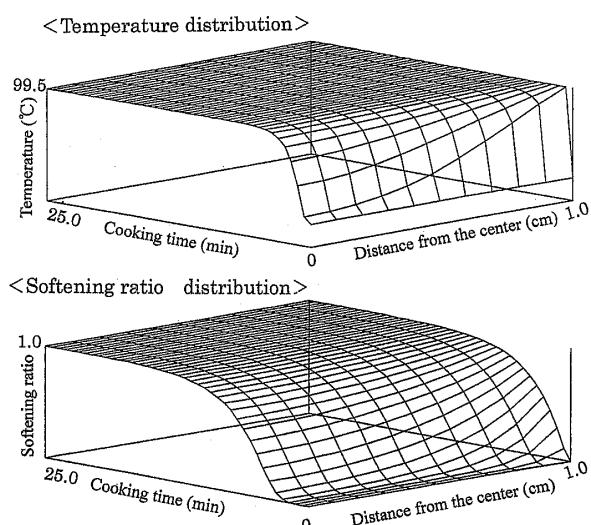


Fig. 6. Time dependence of temperature and softening ratio distributions for the sphere shaped sample with 2cm diameter during cooking at 99.5°C

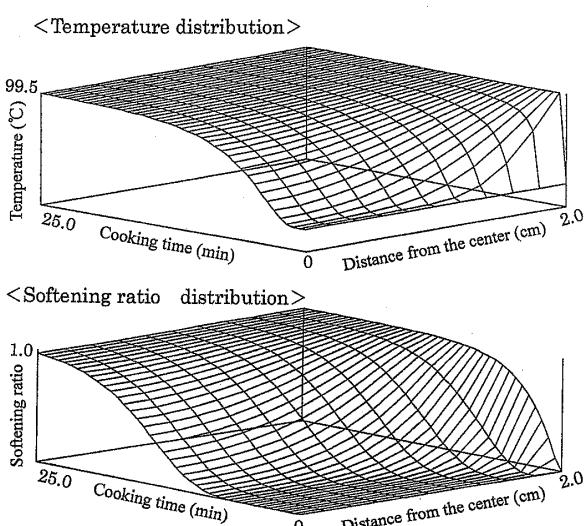


Fig. 7. Time dependence of temperature and softening ratio distributions for the sphere shaped sample with 4cm diameter during cooking at 99.5°C

に伴う温度および軟化率の変化を試料内の各点について経時的に算出し、分布状態を数値的に把握することを試みた。

Fig. 6 は直径が 2cm の球の中心から表面までを 10 等分した各点における温度と軟化率の経時変化を 3 次元のグラフで示したものであり、Fig. 7 は同じく直径が 4cm の球についての結果である。Fig. 6 および Fig. 7 ともに加熱によって試料内の各点における温度および軟化率が刻々と変化していく過程が視覚的に表現されている。いずれにおいても温度より軟化率の方が遅れて上昇し、加熱とともに温度分布が小さくなつてからも軟化率には分布がみられた。特に軟化率分布は大きさの影響が顕著で、Fig. 6 に示した直径 2cm の球では加熱 11 分間で中心部の軟化率が 0.9 に達したのに對し、Fig. 7 に示した直径 4cm の球ではほとんど軟化率が増加していない。この間表面部は大きさによらず同程度に軟化しており、直径 4cm ではさらに加熱が続くため最終的な軟化率の分布は直径 2cm よりかなり大きいことになる。

既報（香西と島田 1985）において立方体が大きくなるほど中心部と表面部の軟化率の差が大きくなることを考慮して、平均的な軟化率の値を有する代表点という概念を導入した。最適加熱時間を予測する際に最も煮熟が遅い中心部に注目する方法と代表点を設ける方法が考えられるが、代表点の位置は算出法により多少異なるてくる。そこで既報同様の方法で球の代表点を求めたところ、立方体同様中心と表面のほぼ中間的な位置にあった。そこで中心部と代表点における最適加熱時間を感覚評価によって比較するために直径 2cm および 4cm の球のそれぞれにおける最適加熱時間で加熱し、官能検査を行った。その結果、Table 2 に示し

Table 2. Sensory score of the predicted optimum cooking time for sphere model

Size(Diameter)	Sensory score	
	Time 1	Time 2
2cm	-0.37±0.48 (11'03")	-0.12±0.63 (10'45")
4cm	0.13±0.25* (22'54")	0.50±0.45 (21'20")

Time 1: Predicted cooking time at the point of center of the sample

Time 2: Predicted cooking time at the middle point between center and surface for the sample

Times in the parenthesis are the predicted cooking time at 99.5°C.

\*p<0.05

たように直径 2cm ではいずれの加熱時間においてもほぼ同程度の煮熟度であり有意差がなかった。一方、直径 4cm では中心部の最適加熱時間で加熱した方が代表点のそれよりやや煮熟度が進んだ評点となり有意差がみられた。しかし、大きさによらずいずれの加熱時間においても評点がほぼ適度な範囲とみなせる -0.5 から +0.5 の間にあった。この理由として人間の感覚評価に多少の幅があること、適度な煮熟度付近では硬さの値に幅があること、調理によって適度な煮熟度とする基準がやや異なることなどが考えられる。従って通常調理に用いる範囲の大きさでは中心部の加熱時間を調理の目安と考えてよく、特に煮くずれが望ましくない場合は代表点に着目したやや短い加熱時間で加熱するのがよいと考える。

最後に形が一定の場合、試料内部温度や最適加熱時間に及ぼす大きさの影響について検討した。温度については熱伝導解析に用いたそれぞれの形における解析解の式 (2), (5), (8), (9) より大きさが n 倍になると同じ割合の位置で同じ温度になるまでの時間は  $n^2$  倍になることがわかる。しかし、軟化率については計算過程が複雑であり、個々について計算する必要がある。既報(香西と島田 1985)において代表点における立方体の最適加熱時間を大きさの 2 次関数で表し(式 (13)), 近似式として有効であった。そこで同様の方法により球の最適加熱時間を大きさの 2 次関数で表し、両者を比較した。

立方体

$$\Theta = 0.98L^2 + 0.67L + 6.15 \quad (13)$$

球

$$\Theta = 0.8R^2 + 0.4R + 6.15 \quad (14)$$

ここで  $\Theta$  は最適加熱時間(min), L は立方体の一辺の長さ(cm), R は球の直径(cm) である。式 (14) で表された球の 2 次曲線は式 (13) で表された立方体のそれより大きさの変化に対する最適加熱時間の影響がやや小さい曲線であり、立方体や球の最適加熱時間に及ぼす大きさの影響が温度ほど単純でないことが示された。この理由として殺菌のように中心部が所定温度に達することを目的とする加熱に比べて調理では適度な可食状態になるまで加熱するので所定温度に達した後も加熱を続ける必要があり、その結果、最適加熱時間に及ぼす形状の影響が複雑になるためと考えられる。

以上、本研究はゆで加熱における試料の形状の影響を数量的に比較するために 7 種類の各種形状モデルの中心部における温度、軟化率および最適加熱時間を算

出したものである。ここで得られた値は前述したようにある程度幅をもったものではあるが、相対的な比較を行う上で有用な知見であると考える。

## 要 約

ジャガイモを 99.5°C で加熱するときの最適加熱時間に及ぼす形状の影響を計算機シミュレーションにより数量的に検討した。軟化の速度定数と組み合わせた熱伝導解析に基づいて軟化率を算出した。種々の形状の中心部において最適軟化率に達するのに必要な最適加熱時間を求めた。試料の体積が一定のとき、最適加熱時間は球 > 立方体 > 円柱、立方体 > 平板の順になった。体積が一定の場合は表面積が大きいほど最適加熱時間が短かった。体積増加に伴う平板状試料の最適加熱時間の増加は非常に小さく、体積と表面積の比が小さいことに起因していた。以上の結果、食品加工において平板はもっとも最適加熱時間が短く、硬さの制御に有効であることが数量的に明らかにされた。

## 文 献

- Carslaw, H. S. and Jaegir, J. C. (1959) "Conduction of Heat in Solids, 2nd ed. (Oxford University Press)
- 岡崎尚, 鈴木寛一, 前重静彦, 久保田清 (1991) 蒸煮によるジャガイモの軟化現象に対する速度論的解析, 日食工誌, 38, 784-788
- Harada, T., Tirtohusodo, H. and Paulus, K. (1985) Influence of temperature and time on cooking kinetics of potatoes., *J. Food Sci.*, 50, 459-462
- Huang, Y. T. and Bourne, M. C. (1983) Kinetics of thermal softening of vegetables., *J. Texture Studies*, 14, 1-9
- 香西みどり, 島田淳子(1985) 煮熟によるジャガイモの軟化度と最適加熱時間の予測, 日食工誌, 32, 360-364
- 香西みどり, 中川弥子, 谷澤容子, 畑江敬子, 島田淳子 (1992) 根菜類の収穫月、鮮度および部位が最適加熱時間の予測に及ぼす影響, 日食工誌, 39, 41-48
- 香西みどり, 中村文子, 畑江敬子, 島田淳子(1998) 非等温加熱における最適加熱時間の予測, 家政誌, 49, 373-381
- Kasai, M., Keiko, H., Shimada, A. and Iibuchi, S. (1994) A kinetic Study of Hardening and Softening Processes in Vegetables during Cooking., *J. Jpn. Soc. Food Sci. Technol.*, 42, 594-601
- Kubota, K., Oshita, K., Hosokawa, Y., Suzuki, K. and Hosaka, H. (1978) Studies of cooking-rate equations of potato and sweet potato slices., *J. Fac. Fish Anim. Husb., Hiroshima Univ.*, 17, 97-106
- 久保田清, 高崎かほる, 藤本真紀子, 鈴木寛一, 保坂秀明 (1980) ダイコンおよびニンジン薄片の蒸煮速度式

シミュレーションによるジャガイモの最適加熱時間に及ぼす形状の影響

- に関する研究, 日食工誌, 27, 157-160  
11) 久保田清, 藤本真紀子, 鈴木寛一, 高崎かほる, 保坂  
秀明 (1981) 球状根菜類系食品の熱拡散率の算出に関する  
研究, 日食工誌, 28, 68-79  
12) 松裏容子, 香西みどり, 畑江敬子, 島田淳子 (1989)  
野菜の最適加熱時間の予測, 日食工誌, 36, 97-102

- 13) 二国二郎編, (1961) 「デンプンハンドブック」p. 357,  
朝倉書店  
14) 山田豊一 (1970), 馬鈴薯の伝熱特性について, 農化,  
44, 587-590

(1998年12月17日受理)