

非等温加熱における最適加熱時間の予測

香西みどり, 中村文子*, 畠江敬子, 島田淳子

(お茶の水女子大学生活科学部, * 東京電力(株))

原稿受付平成9年9月6日; 原稿受理平成9年12月25日

Prediction of the Optimum Time for Non-Isothermal Cooking

Midori KASAI, Fumiko NAKAMURA, * Keiko HATAE and Atsuko SHIMADA

School of Human Life and Environmental Science, Ochanomizu University, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8610

*Tokyo Electric Power Company, Tsurumi-ku, Yokohama 230-0000

The optimum cooking time was determined for leaving a potato to cook after it has been heated to boiling point and the heat input removed. A numerical simulation used a three-dimensional mesh model, and the surface node temperature was determined from the measured values for water. The internal temperature of the sample was calculated by an unsteady three-dimensional heat conduction analysis based on the finite difference method. The softening process was predicted by calculating of softening ratio with the softening rate constant applied. The duration time at boiling point was calculated when the sample center temperature and the softening ratio had reached 70°C and 0.9, respectively. The calculated temperature of the sample center was in fairly good agreement with the experimental value. The time predicted for the boiling duration for non-isothermal cooking was markedly less than that for isothermal cooking at 99.5°C. This simulation elucidates that, even though the sample is undercooked when the heating is stopped, softening is optimized by the residual heat. The residual heat effect was increased by increasing sample size and total weight. The reliability of the prediction was confirmed by the hardness measurements and sensory evaluation.

(Received September 6, 1997; Accepted in revised form December 25, 1997)

Keywords: softening 軟化, potato ジャガイモ, optimum cooking time 最適加熱時間, residual heat 余熱, non-isothermal cooking 非等温加熱.

1. 緒 言

食品の調理加工において加熱温度および時間などの加熱条件を予測し, 制御することは, 食品の嗜好性のみならず消費エネルギーなど種々の観点から重要な課題である。著者らは先に野菜の軟化の速度定数と官能検査による最適軟化率を組み合わせて一定温度で加熱する場合の最適加熱時間の予測を行った(香西と島田 1985; 松裏等 1989; 香西等 1992)。さらに, この予測法を応用して調理用熱量測定装置を用いて省エネルギー的調理条件を検討した(香西等 1986)。そこでは余熱利用効果を消費エネルギーの点から把握することはできたが, 試料内部の状態を数量的に明らかにするには至らなかった。本研究はジャガイモを試料として一定温度ではなく, 非等温加熱における軟化を数量的に検討することを目的としたものである。

食品加工においては, 加熱殺菌過程に加熱および冷却媒体の温度が変化するときの微生物の死滅率やビタミンの保持率などの報告はみられるが (Teixeira *et al.* 1975, Thijssen *et al.* 1980, Chang and Toledo 1990), 物性に着目した例はほとんどない。野菜の軟化については, 一定温度で加熱する場合の試料内部の非等温期間を考慮して軟化の速度定数を修正した報告はあるが (岡崎等 1991, 1992), 非等温加熱において適度な煮熟状態を得るための最適加熱時間を予測した例はない。実際の調理では試料を水と共に加熱したり, 加熱停止後も放置して余熱を利用することがある。このように経験的に余熱利用の効果は知られてはいるものの, どの時点で加熱を停止したらよいかについての数量的検討は明らかにされていない。そこで本研究では沸騰までの水温上昇期, および加熱停止後の水温下

降期の水温を無駄なく利用したゆで加熱のシミュレーションを行い、本加熱法の最適加熱時間を予測することにより余熱の効果を定量的に明らかにした。

2. 方 法

(1) 試料内部温度の計算

本研究では試料の周囲温度が変化する、すなわち境界条件が時間と共に変化する場合を対象とするため、差分法による数値解析を行って3次元熱伝導解析により試料の内部温度を算出した。計算に必要な試料の外周節点温度として水温変化の実測値を用いた。

3次元の熱伝導方程式は次式で表現される。

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

ここで T は温度 (°C), θ は加熱時間 (min), X, Y, Z は中心からの距離 (cm), a は熱拡散率 (cm^2/min) である。3次元試料をメッシュ分割し、(1)式の時間微分および空間微分を近似的に差分方程式で表し、時刻を k として座標 m, n, p について解くと次式になる (Holman 1982)。

$$\begin{aligned} T_{m,n,p}^{k+1} = & a \Delta \theta \left(\frac{T_{m+1,n,p}^k + T_{m-1,n,p}^k}{(\Delta x)^2} \right. \\ & + \frac{T_{m,n+1,p}^k + T_{m,n-1,p}^k}{(\Delta y)^2} \\ & + \frac{T_{m,n,p-1}^k + T_{m,n,p+1}^k}{(\Delta z)^2} \Big) \\ & + \left[1 - \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{(\Delta z)^2} \right) 2a \Delta \theta \right] T_{m,n,p}^k \end{aligned} \quad (2)$$

ここで m は x 座標, n は y 座標, p は z 座標を表す。 $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ とすると解が安定するための制約条件は

$$(\Delta x)^2 / (a \Delta \theta) \geq 6 \quad (3)$$

である。本研究では時間増分を1秒、空間増分を1mmとし、熱拡散率は文献値 $0.09 \text{ cm}^2/\text{min}$ (久保田等 1981) を用いた。試料温度の計算においては加熱中および加熱後について以下の近似的取扱いを行った。

- ① 試料各面での表面温度は水温測定値で代表される。
- ② 試料成分および組織構造は均一とみなす。
- ③ 試料の熱拡散率は一定とする。
- ④ 試料の初期温度は 20°C 、形状は一辺が $1 \sim 4 \text{ cm}$ の立方体とする。

(2) 軟化率の計算

硬さの変化率として軟化率 x を次のように定義した (Kubota *et al.* 1978)。

$$x = \frac{y_0 - y}{y_0 - y_e} \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (4)$$

y_0 は硬さの初期値 (kgf), y は硬さの測定値 (kgf), y_e は軟化の平衡値 (kgf) である。既報 (香西と島田 1985; 松裏等 1989) に準じ、軟化率を一次の速度式に近似すると次式で表現される。

$$\frac{dx}{dt} = k(1-x) \quad (5)$$

k は軟化の速度定数 (min^{-1}), t は加熱時間 (min) である。 k は (6) 式に示す温度の関数であり、試料の内部温度を軟化の速度定数に変換して軟化率の計算を行った。軟化の速度定数は次式を用いた (松裏等 1989)。

$$k = 6.99 \times 10^{-9} \exp(-1.45 \times 10^5 / RT) \quad (6)$$

ここで R は気体定数 ($8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$), T は絶対温度 (K) である。最適軟化率は 0.9 とした。

(3) 最適加熱時間の計算

あらかじめ各条件における水温測定値の時間変化を入力しておく。所定の試料の大きさに対し、沸騰継続時間の初期値として 0 を入力する。このときの試料内部各点の温度および軟化率の経時変化を計算により求める。70°C における k は 99.5°C における 0.332 (min^{-1}) に比較して 0.006 (min^{-1}) と非常に小さく、試料の中心温度が 70°C 以下になると軟化率の増加がほとんどみられないことから、最適加熱時間の予測は中心温度が 70°C になったときに最適軟化率 0.9 に達するか否かで判断した。もし、達していないければ沸騰継続時間を 1 秒増加して繰り返し計算を行い、軟化率が 0.9 に達した時点で計算を終了した。沸騰継続時間の初期値 0 すでに軟化率が 0.9 を超えたときは沸騰前何秒で加熱を停止するかの計算を行うため、初期値を -100 秒として再び同様の繰り返し計算を行った。なお、計算終了の判断は軟化率 0.9000 を用いた。以上の計算はプログラムを作成し、ワークステーション (Sun Spark Station) により行った。

(4) 実 験

1) 試 料

ジャガイモ (北海道産男爵) を実験当日、小売店より入手した。成型器を用いて 1 個約 160~200g のジャガイモの維管束の内側から 1~3 cm 角立方体に成型した。温度測定の際はあらかじめ室温の水 (約 15

非等温加熱における最適加熱時間の予測

℃) に 1 時間浸漬した。

2) 水温および試料内部温度の測定

水温変化の測定は水のみの場合と、各水量の 50% (w/w) を 3 cm 角試料で置き換えた場合について行った。水のみの場合は、アルマイト製角型鍋 (一边 22 cm, 重量 650 g) に水道水 (1~4 l) を入れ、蓋をしてガスコンロで加熱した。火力は都市ガスのハイカロリー形 (3,200 kcal/h) バーナーで、沸騰までは強火、沸騰後は弱火とし、水温は $99.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ の範囲に保つよう調節した。沸騰継続による水の蒸発量は水量の 1~2% 程度であったので、水量に対して無視できるとした。試料が入った場合は鍋に水道水を 0.5~2 l, 3 cm 角試料を 0.5~2 kg 入れ、総重量を 1~4 kg として、加熱した。いずれも加熱停止後、蓋をしたまま室温に放置した。加熱中および加熱停止後の水温を鍋底から約 2 cm の位置に固定した銅-コンスタンタン熱電対 (直径 1 mm) により測定し、熱電対に接続したデジタル温度計 (タケダ理研; TR2721 A) で 30 秒間隔に自動記録した。

以上の測定は室温 $21 \pm 2^\circ\text{C}$ の実験室で行い、繰り返しは 3~5 回行った。

3) 硬さの測定

予測した最適加熱時間で加熱した 1 および 3 cm 角試料の硬さをテクスチュロメーター (全研; GTX 2) により測定した。試料の測定条件はプランジャー V 字型、クリアランス 1 mm、咀嚼スピード 6 回/min とした。3 cm 角試料の場合は中心部より 1 cm 角を切り取り、測定した。

4) 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: やや煮熟しそう, +2: 煮熟しそう) 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。

3. 結果および考察

(1) 水温変化の実測値

試料内部温度の算出には試料周辺の水温の実測値が必要である。加熱中および加熱停止後の水温変化には水、試料および容器の総重量、試料の成分および形状、容器の材質および形状、周囲空気の温度や風速、さらに加熱器具の種類など種々の要因が複雑に関与する。本研究ではこれらの要因のうち、水と試料の総重量の影響に着目し、水温変化に対して試料重量の影響が無視できる程度に少ない場合と、試料の表面をゆで水が覆う限界となるような場合について検討した。水温測定は前者については水のみで 1~4 kg、後者については 3 cm 角試料重量が総重量 1~4 kg の 50% に達する場合とした。加熱停止は沸騰直後とした。

水温測定の結果を Fig. 1 および Table 1 に示した。Fig. 1 は水温変化に対して試料重量の影響が無視できる程度に少ない場合 (a) と、試料重量が総重量の 50% をしめる場合 (b) の水の温度曲線である。Fig. 1 に示したように (b) の方が (a) よりもやや早く沸騰し、加熱停止直後の温度降下が速くなつた。この傾向を数値的にとらえるために、 $20 \sim 99.5^\circ\text{C}$, $99.5 \sim 90^\circ\text{C}$, $90 \sim 80^\circ\text{C}$ および $80 \sim 70^\circ\text{C}$ の各温度範囲における水温変化速度を求めた結果が Table 1 である。(a) についてみると、当然ながら水量が多くなるほど水温上昇および下降速度が緩やかになった。一方、(b) では同じ総重量における (a) より水温上昇速度が速く、かつ $99.5 \sim 90^\circ\text{C}$ の水温下降速度も速かった。その結果、この温度範囲の水温利用時間も短くなつてゐる。この理由として (b) では (a) と総重量が同じでも水量

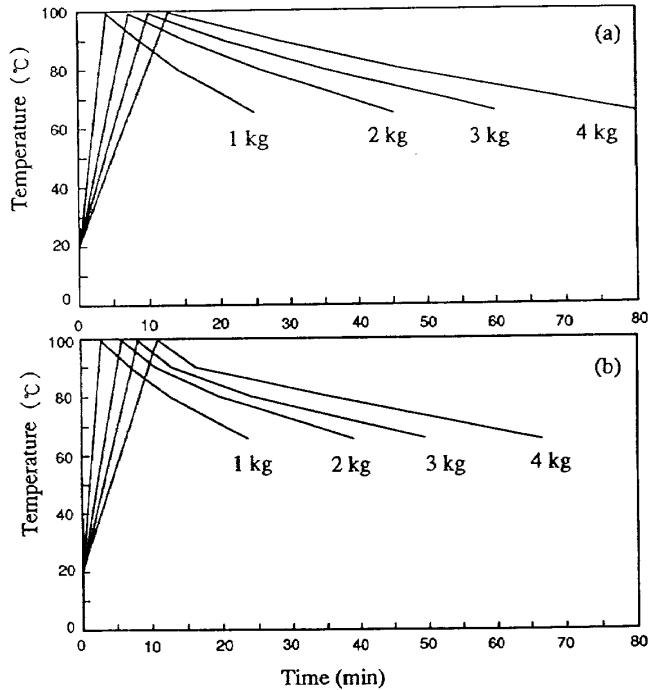


Fig. 1. Time-course plots of water temperature under various conditions

(a) When the effect of the sample weight is negligible. (b) When the effect of the sample weight is 50% of the total weight. The numerical values attached to the curves indicate the total weight of the water plus sample.

Table 1. Changes in water temperature (°C/min) and required time (min) at the temperature range

Total weight (kg)	Temperature range (°C)	Change of the water temperature (°C/min)			
		a		b	
1 kg	20-99.5	19.9±0.3	(4.0)	26.1±0.9	(3.1)
	99.5-90	2.0±0.1	(4.8)	2.3±0.2	(4.1)
	90-80	1.8±0.03	(5.6)	1.8±0.2	(5.7)
	80-70	1.4±0.03	(7.3)	1.3±0.05	(7.5)
	20-99.5	11.1±0.3	(7.2)	13.6±0.1	(5.9)
	99.5-90	1.2±0.08	(8.3)	2.0±0.4	(4.9)
2 kg	90-80	1.0±0.03	(10.2)	1.1±0.1	(8.9)
	80-70	0.8±0.04	(13.2)	0.8±0.1	(13.3)
	20-99.5	8.0±0.1	(10.0)	9.7±0.1	(8.2)
	99.5-90	0.9±0.1	(10.8)	2.0±0.4	(4.7)
	90-80	0.7±0.01	(14.1)	0.9±0.1	(11.2)
	80-70	0.6±0.03	(17.5)	0.6±0.03	(17.2)
3 kg	20-99.5	6.2±0.01	(12.8)	7.3±0.1	(11.0)
	99.5-90	0.6±0.01	(15.1)	1.8±0.2	(5.3)
	90-80	0.5±0.01	(18.2)	0.5±0.1	(18.9)
	80-70	0.4±0.01	(22.7)	0.5±0.04	(20.8)

Parenthesized numbers (min) indicate the time required for passing the temperature range. a: when the effect of the sample weight is negligible. b: when the effect of the sample weight is 50% of total weight.

が少ないために温度上昇速度が速くなり、水温下降期では温度下降速度が速くなったと考えられる。しかし、この影響は温度の低下と共にほとんどみられなくなり、90°C以下では(a), (b)の水温変化速度はほぼ等しくなった。これは99.5~90°Cの水温下降期に試料の内部温度が上昇し、試料の周囲の水温に近くなるためと考えられる。Table 1に示した水温変化速度(a), (b)は総重量に対する試料の重量比が極端な場合であり、実際の調理においてはこれらの範囲内にあると考えられる。以下、ここに示した水温変化(a), (b)を用いて沸騰継続および余熱利用時間の計算を行った。

(2) 試料形状および水量別最適加熱時間の予測

はじめに、水温変化より予測される試料内部温度の実験値が計算値と一致するか否かについて検討した。

Fig. 2は水温実測値および試料中心温度の実測値と計算値の一例を示したものである。図に示したように、試料温度の実測値と計算値は水温上昇期においてはややずれがみられるものの、加熱停止後の水温下降期においてはほぼ一致した。沸騰までの期間は温度上昇速度が大きく水温の温度分布が大きいことと、試料と水温との温度差が大きいことによる影響があると考えられ、水温下降期ではその影響が少ないためと考えられ

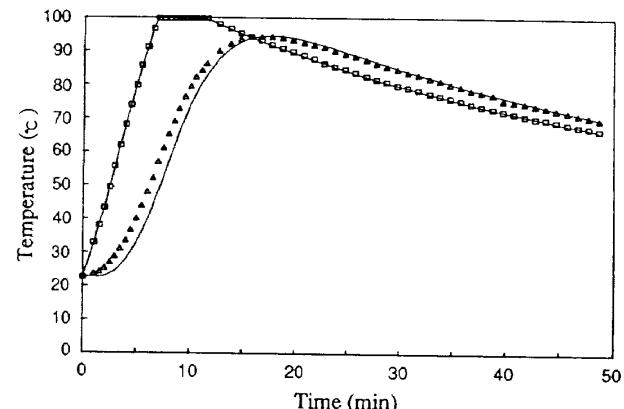


Fig. 2. Comparision of the center temperature of a potato between the calculated and experimental values

—□—, experimental water temperature for 2 kg in total weight; △, experimental center temperature for a cubic potato with an edge of 3 cm; —, calculated center temperature for a cubic potato with an edge of 3 cm.

る。また、計算値の場合は試料表面温度を水温で近似しているため、沸騰までの期間では対流による伝熱の促進の影響がより大きいことも考えられる。以上、水温が刻々と変化する場合の試料内部温度の予測が可能

非等温加熱における最適加熱時間の予測

であると判断できたので、次に試料の形状、水量別に試料中心部の温度および軟化率の予測を行った。

Fig. 3-A～P は水温変化 (a) を用いた計算結果である。1～4 cm 角試料を総重量 1～4 kg で加熱したときの水温変化、試料中心部の温度および軟化率の経時変化が各条件ごとに一つの図に描かれている。試料の温度は軟化に影響する 70℃まで、軟化率は加熱の終点である最適軟化率 0.9 になるまで計算されている。計算結果の一例として Fig. 3-2-J に示した 3 cm 角試料を水量 2 kg で加熱した場合についてみてみると、沸騰直後における試料中心温度は 47℃、軟化率は 0 であり、沸騰継続 3.5 分後に加熱停止したときの中心温度は 77℃、軟化率は 0.01 である。加熱停止後 36.5 分経た後には中心温度が 70℃、軟化率が 0.9 になり、このときの水温は 66℃となっている。この結果は加熱停止時に試料内部温度が低く、ほとんど軟化が進行していないくとも、加熱停止後の水温を利用して試料の中心部まで十分に煮熟できることを示している。すなわち、余熱利用は加熱を継続しなくとも時間をかければ加熱と同等の効果があることを示すもので、従来経験的に知られている余熱の効果が Fig. 3 において数量的に表現されている。Fig. 3 の A～P はこの余熱利用効果の程度が試料の形状、水量によって異なることを示している。加熱停止時の軟化率が小さいほど余熱利用によって試料が煮熟される割合が高いことを意味する。このような観点でみると試料が同一形状の場合には水量が多いほど、また同一水量では試料が大きくなるほど余熱利用効果が大きいといえる。特に 1, 2 cm 角試料で水量 3, 4 l および 3, 4 cm 角で水量 4 l の場合などでは沸騰前に加熱を停止しても、その後の水温を利用するだけで軟化率が 0 から最適軟化率 0.9 に達することが示されている。このことは軟化に必要な温度と時間が供給されれば沸騰継続の必要がないことを意味している。ここで興味深いのは、2 cm 角以上の試料において加熱停止後にいったん試料中心温度が上昇して水温よりも高くなり、この関係を保ったまま緩やかに温度降下している点である。この傾向は試料が大きいほど明瞭であり、試料が大きいほど試料自身のもつ余熱効果も加味され、加熱停止後の試料内部の温度降下を遅らせるものと考えられる。

次に Table 2 に (a), (b) の沸騰継続時間および余熱利用時間を比較した結果を示した。試料が総重量の 50% まで入っている場合の (b) の沸騰継続時間は、試料重量が無視できる程度に少ない場合の (a) に比

べて長くなる一方で、余熱利用時間が短くなっている。これは Table 1 に示したように、水温変化 (a) より (b) の方が水温上昇期および下降期の水温利用時間が短いために沸騰継続時間が長くなり、その結果として (b) の方が試料中心温度が高い状態で加熱を停止するため、余熱利用時間が短くなるためと考えられる。したがって、沸騰までの加熱時間を含めた全体の加熱時間は (a), (b) ともほとんど同じか、(b) の方がやや短くなっている。

本研究が対象とする加熱法は水から加熱し、余熱を利用するものであるが、既報（香西と島田 1985）に準じ、99.5℃の一定温度で加熱するときの最適加熱時間を本研究で用いた軟化の速度定数を用いて計算すると、1, 2, 3 および 4 cm 角試料でそれぞれ 8.5, 12.6, 19.1 および 27.7 分である。これらの沸騰継続時間に比較すると水温変化 (a), (b) いずれの場合も沸騰継続時間が著しく減少している。99.5℃の一定温度で加熱した場合、試料が大きくなるほど試料外周部の軟化が過度に進行し、中心部との軟化率の差が大きくなる（香西と長尾 1997）。この過度の軟化を防止する意味でも余熱を利用した加熱は効果的である。加熱停止後に蓋をしたまま放置するだけで、時間はかかるものの最終的に加熱と同等の効果が得られ、かつ煮崩れの防止の意味でも有効であるということは本加熱法が省エネルギー的にも嗜好的にも非常に有用であることを示している。

最後に予測した加熱時間で実際に試料を加熱し、硬さの測定および官能検査による煮熟度の評価を行った。

実験は水温変化 (a), (b) を用いて予測された 1 および 3 cm 角試料について行った。総重量は 2 kg とし、沸騰継続および余熱利用時間はそれぞれ Table 2 に示したとおりである。Table 3 に硬さを軟化率で表したものと、官能検査の結果を示した。いずれについても予測値は軟化率 0.9、煮熟度の評点は -2 ～ +2 の 5 段階のうち 0 点である。先に（香西等 1992）人間の感覚評価に幅のあることを考慮して適度な煮熟度に対する評点の範囲を 0 ± 0.5 とみなしたが、これを既報（香西と島田 1985）の硬さの値に対応させ、さらに軟化率に変換すると 0.85 ～ 0.97 の範囲になる。

Table 3 に示したように、実験による軟化率は 0.85 ～ 0.94、煮熟度の評点は -0.19 ～ 0.17 の範囲にあり、いずれもほぼ適度な煮熟度の範囲であることが確認できた。本結果より、水温が刻々と変化する場合の加熱においても、差分法による試料内部温度の予測と軟化

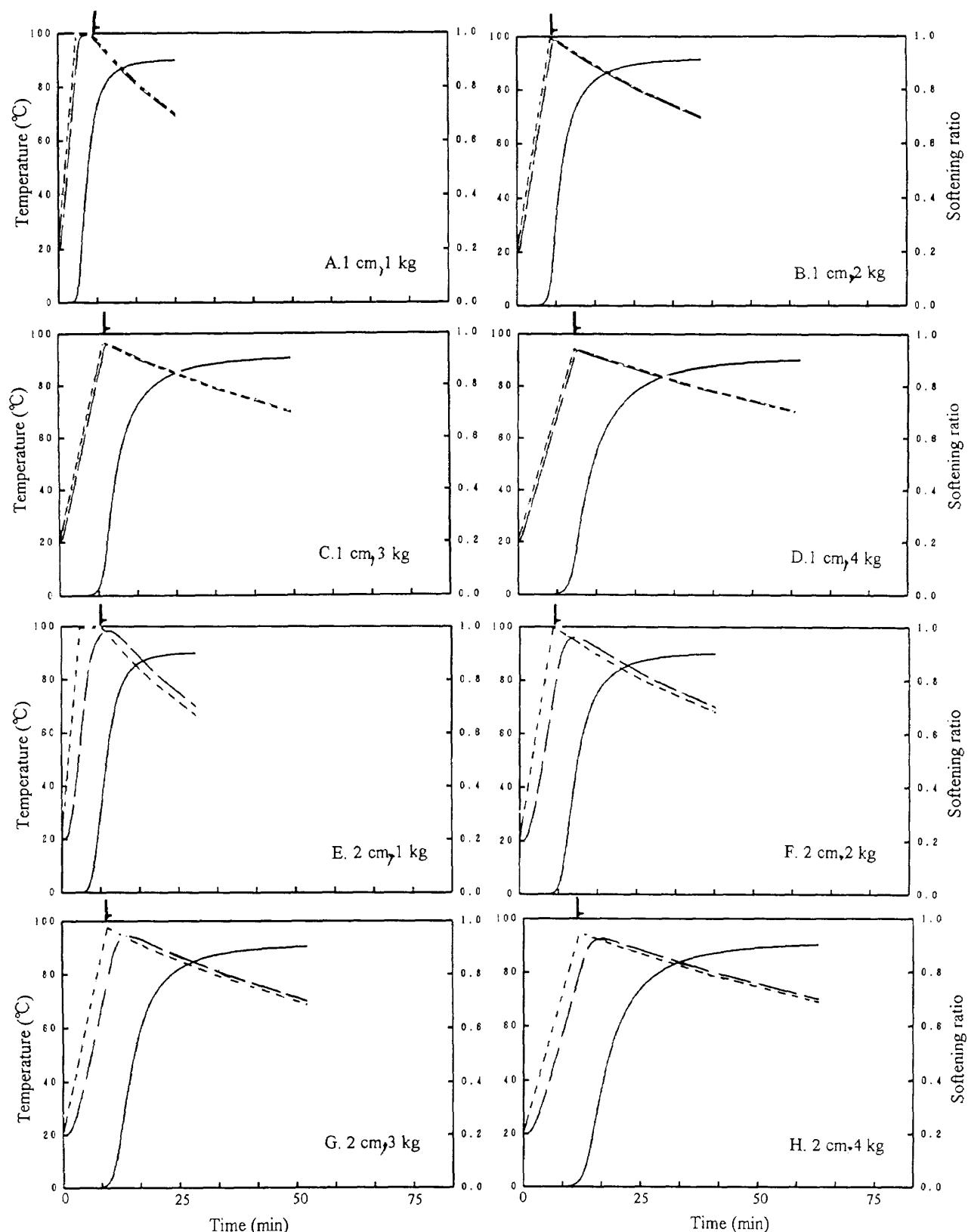


Fig. 3-1. Simulation for predicting optimum time for non-isothermal cooking

The numerical values in the figures show the sample size and total weight in that order. ----, experimental water temperature for each condition; —, calculated center temperature for a cubic potato of each size; ——, calculated center softening ratio for a cubic potato of each size. Arrows represent the end of heating.

非等温加热における最適加熱時間の予測

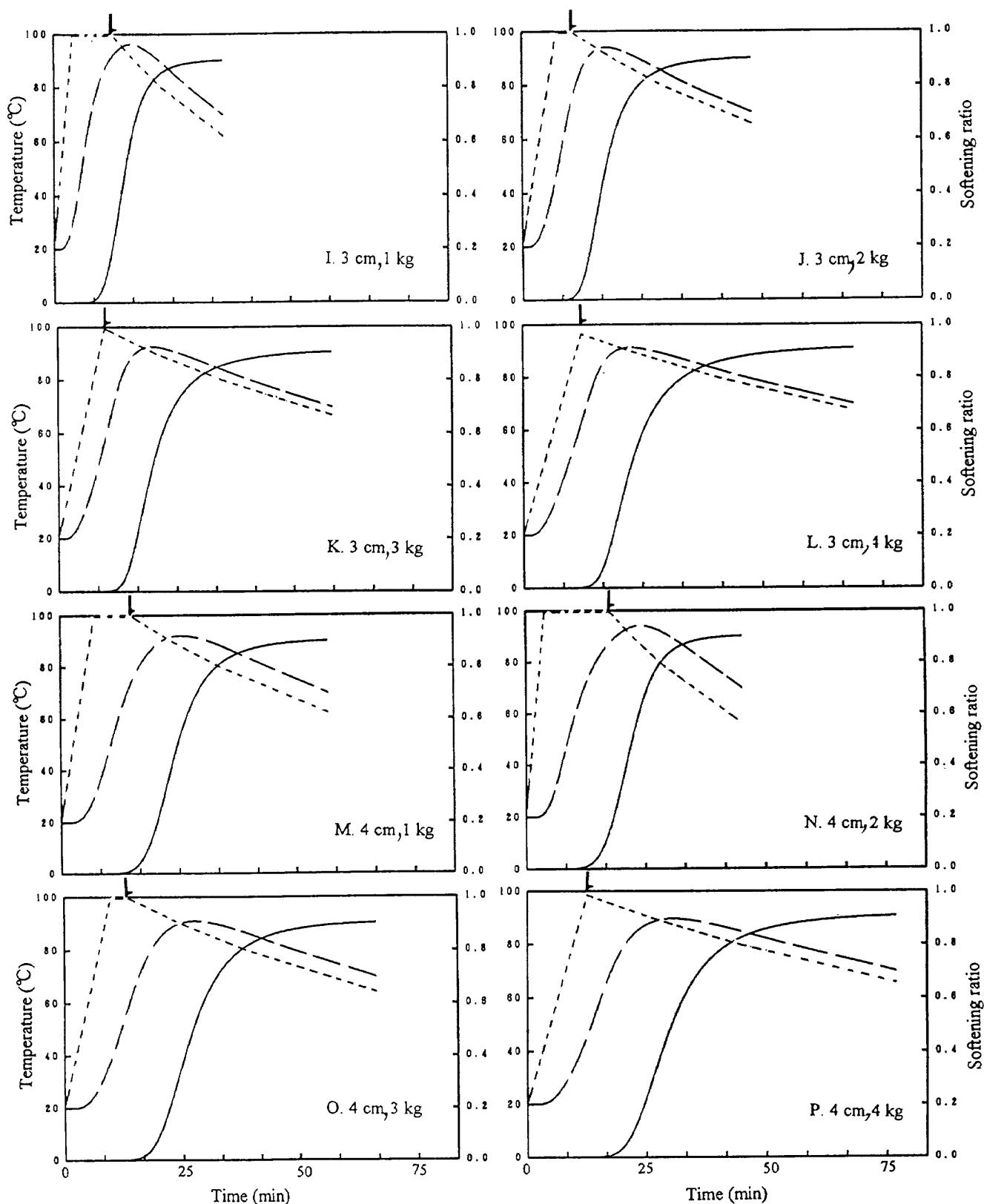


Fig. 3-2. Simulation for predicting optimum time for non-isothermal cooking

The numerical values in the figures show the sample size and total weight in that order. ----, experimental water temperature for each condition; ——, calculated center temperature for a cubic potato of each size; ——, calculated center softening ratio for a cubic potato of each size. Arrows represent the end of heating.

Table 2. Time at boiling point and required time for residual heating (min)

Size		Total weight (kg)							
		1 kg		2 kg		3 kg		4 kg	
		a	b	a	b	a	b	a	b
1 cm	Time 1	3.0	3.5	0	1.8	-0.3	1.5	-0.8	-0.2
	Time 2	17.5	15.0	20.1	25.8	32.7	30.4	45.8	42.1
2 cm	Time 1	4.8	5.4	0.7	3.2	-0.3	2.6	-0.8	0
	Time 2	19.3	17.6	32.7	26.8	36.7	34.8	45.3	42.7
3 cm	Time 1	8.5	9.3	3.6	6.4	0	5.3	-0.5	2.2
	Time 2	22.5	22.1	36.5	31.8	41.1	36.0	44.0	49.0
4 cm	Time 1	13.8	14.6	8.1	11.2	3.8	10.1	-0.2	6.0
	Time 2	27.2	25.8	41.6	37.3	50.1	40.8	54.9	53.1

a: When the effect of the sample weight is negligible. b: When the effect of the sample weight is 50% of the total weight. Time 1: time at the boiling point. Time 2: required time for residual heating. Size implies the length of the edge of a cubic sample. Minus means that heating was stopped before reaching boiling point. Cooking time was calculated to get the optimum softening ratio.

Table 3. Sensory score and softening ratio for the predicted optimum cooking time

Size	Sensory score		Softening ratio	
	a	b	a	b
1 cm	0.19±0.81	0.05±0.96	0.85±0.2	0.91±0.1
3 cm	0.02±0.64	0.17±0.88	0.86±0.1	0.94±0.2

Size implies the length of the edge of a cubic sample. a: When the effect of the sample weight is negligible. b: When the effect of the sample weight is 50% of the total weight.

の1次速度式における速度定数を用いた軟化率の算出により、最適加熱時間の予測が可能であることが示された。

本研究で行ったシミュレーションにより、加熱停止後の水温を利用した余熱の効果が、軟化の進行をほぼ0から適度な状態にまで変化させ得るほど大きなものであることが数値的に明らかになった。このことは調理加工における省エネルギー的観点からも、非常に有用な知見であると考える。

4. 要 約

ジャガイモを沸騰まで加熱し、加熱停止後もそのまま放置した調理における最適加熱時間の計算を試みた。数値的シミュレーションにおいては3次元メッシュモ

デルを用い、外周節点温度は水温の実測値より求めた。試料内部温度は差分法による非定常3次元熱伝導解析により算出した。軟化過程は軟化の速度定数より軟化率の算出を行った。沸騰継続時間は試料中心温度が70°Cになったときに最適軟化率が0.9になるように算出された。計算による試料中心温度と実験値はよく一致した。予測した沸騰継続時間は99.5°Cの一定温度に比べ大幅に短くなった。このようなシミュレーションにより、加熱停止時には試料が煮熟不足でも、加熱停止後の余熱により軟化が十分に進行する過程が予測できた。この余熱効果は試料のサイズや総重量と共に大きくなかった。硬さの測定および官能検査より予測値の信頼性が確認された。

本研究の遂行にあたり、計算処理の上でご協力をいただききました東電設計(株)の松田哲夫氏に謝意を表します。

引 用 文 献

- Chang, S.Y., and Toledo, R.T. (1990) Simultaneous Determination of Thermal Diffusivity and Heat Transfer Coefficient during Sterilization of Carrot Dices in a Packed Bed, *J. Food Sci.*, **55**, 199-205
 Holman, J.P. (1982) *Heat Transfer*, McGraw-Hill Book Company, Texas, 119
 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

非等温加熱における最適加熱時間の予測

- 香西みどり, 長尾慶子 (1997) ゆで加熱における最適加熱時間の予測, 家政研究, **27**, 13-19
- 香西みどり, 長尾慶子, 松裏容子, 平野悦子, 畑江敬子, 島田淳子 (1986) 加熱調理における省エネルギーの調理条件の検討, 家政誌, **37**, 533-539
- 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
- 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, 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**, 68-73
- 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
- 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
- 岡崎 尚, 鈴木寛一, 前重静彦, 久保田清 (1992) 非等温および等温熱処理期間に進行するジャガイモの軟化現象のシミュレーション, 日食工誌, **39**, 295-301
- Teixeira, A., Zinsmeister, G.E., and Zahradnik, J.W. (1975) Computer Simulation of Variable Retort Control and Container Geometry as a Possible Means of Improving Thiamine Retention in Thermally Processed Foods, *J. Food Sci.*, **40**, 656-659
- Thijssen, H.A.C., and Kochen, L.H.P.J.M. (1980) Calculation of Optimum Sterilization Conditions for Packed Conduction-type Foods, *J. Food Sci.*, **45**, 1267-1272