

# ゆで加熱における最適加熱時間の予測 —沸騰までの水温上昇および余熱利用の効果—

香 西 みどり  
長 尾 慶 子

食品を加熱して最適な煮熟状態を得るためには加熱温度や時間などの加熱条件が適度であることが重要である。このような最適加熱条件は一般に経験的に知られており、調理のコツやカンといわれている。食品の調理加工において最適条件を設定することは好ましい仕上がり状態を得るためばかりでなく、省エネルギー的にも必要な課題である。著者らはこのような観点から、一定温度における野菜の最適加熱加熱時間の予測に関する研究を行ってきている<sup>1)~3)</sup>。さらに調理用熱量測定装置を作製し、最適加熱時間の予測法を適用して加熱調理における省エネルギー的調理条件を検討した<sup>4)</sup>。その結果、水量などの調理条件によって程度は異なるが加熱停止後の余熱を利用することで使用熱量が15%前後減少し、余熱利用の省エネルギー的効果が把握できた。野菜の加熱による軟化については速度論的研究はみられるが<sup>5)~10)</sup>、加熱時間の予測という観点からの研究はほとんどない。本研究では水とともに試料を加熱し、沸騰までの水温上昇および加熱停止後の余熱利用を組み合わせため加熱の最適加熱時間を計算により求めることを目的とした。

## 実験方法

### 1. 試料

ジャガイモ（男爵）を小売店より購入し、一辺が1~3cmの立方体に成形した。

### 2. 加熱方法および水温変化の測定

水のみ（1~4リットル）を加熱するときは

アルマイト製角形鍋（一辺22cm、重量650g）に入れ、ガスコンロで加熱して加熱中および加熱停止後の水温変化を測定した。火力は都市ガスのハイカロリー形（3200kcal/h）で沸騰までは強火、沸騰後は弱火とし、水温は $99.5 \pm 0.5$ 度の範囲に保った。試料をいれるときは鍋に水0.5~2リットルを入れ、試料を0.5~2kg入れ、総重量を1~4kgとして加熱した。加熱方法は①水から加熱し余熱利用、②沸騰から加熱し、余熱利用、③水から加熱し、余熱なし、④沸騰から加熱し、余熱なしとした。余熱利用の場合は、加熱停止後ふたをしてそのまま放置した。この間の水温変化を鍋底から約2cmの位置に固定した銅—コンスタンタン熱電対（直径1mm）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；TR2721A）で30秒間隔に自動記録した。

### 3. 官能検査

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、やや煮熟しすぎ；+2、加熱しすぎ）により評価した。パネルはお茶の水女子大学調理学研究室員10名とした。

### 4. 計算

計算方法を図1に示した。はじめに差分法による3次元非定常熱伝導解析を行い、試料の分割刻みを1mm、時間間隔を1秒として試料内部温度を算出した。次に既報<sup>1)</sup>の軟化の速度定数および最適軟化率を用いて軟化率 $x$ の計算を行い、ジャガイモの最適軟化率0.9になるまで

## 1. 試料内部温度

差分法による3次元非定常熱伝導解析  
 熱拡散率 : 0.0015cm<sup>2</sup>/sec  
 試料の分割刻み(Δx, Δy, Δz) : 1mm

## 2. 軟化率 x

●軟化率 x の定義

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

y<sup>0</sup>: 硬さの初期値; y<sub>e</sub>: 硬さの平衡値  
 y: 硬さの測定値

●軟化率 x の算出

$$\frac{dx}{d\theta} = k(1-x) \rightarrow x = 1 - \exp(-k\theta)$$

θ: 加熱時間;

k: 軟化の速度定数 (min<sup>-1</sup>)

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

T: 絶対温度 (°K)

頻度因子 A : 6.99 × 10<sup>19</sup> min<sup>-1</sup>

活性化エネルギー: 145kJ/mol

気体定数 R : 8.314kJ/mol/°K

●最適軟化率の値

官能検査により決定 ジャガイモ 0.9

図1 計算方法

の時間を最適加熱時間として求めた。計算はプログラムを作製し、SunSparkStation により行った。計算の流れ図を図2に示した。

## 結果および考察

### 1. 水量別による加熱中及び加熱後の水温変化

はじめに水温変化を種々の水量別に測定した結果を図3に示す。図は3回測定した結果の平均値をモデルにかいたものである。図の矢印は沸騰点および加熱停止点を示している。水量が1リットルから4リットルへと増加するに従い、水温上昇および水温低下が緩やかになった。ここで得られた水温上昇期および水温下降期を利用した加熱における最適加熱時間について以下に述べる。

### 2. 余熱利用の加熱における最適加熱時間

水量別に余熱を利用した場合の試料の中心温

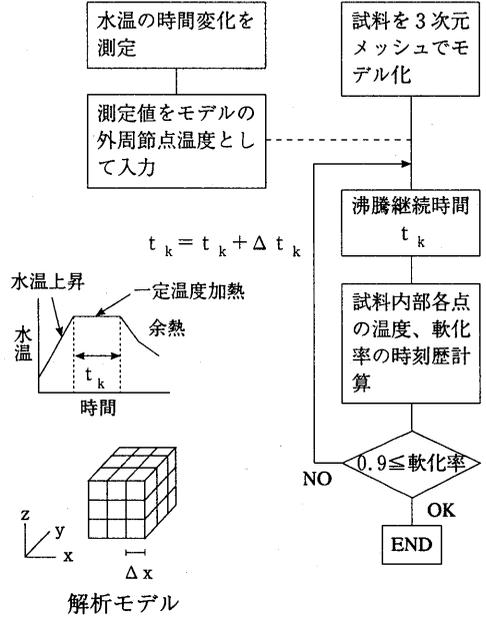


図2 計算の流れ

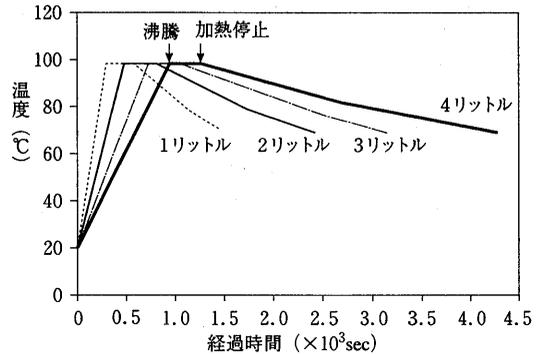


図3 加熱に伴う水温変化 (1~4リットル)

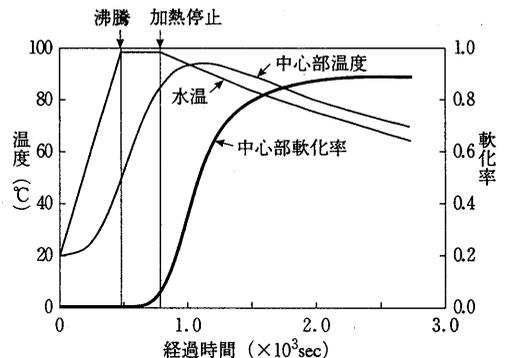


図4 水温変化に伴う試料中心部の温度、軟化率の変化  
 —水から加熱し余熱利用—

水温: 測定値、試料温度: 計算値、軟化率: 計算値  
 水量2リットル、3cm角試料

表1 沸騰時と加熱停止時の試料中心部温度および軟化率  
—水から加熱し余熱利用—

(T: 中心部温度(°C) x: 軟化率)

		1リットル		2リットル		3リットル		4リットル	
		T	t	T	t	T	t	T	t
1 cm	沸騰時	89.1	0.04	93.2	0.10	—	—	—	—
	加熱停止*	99.0	0.68	98.3	0.25	94.1	0.17	91.9	0.16
2 cm	沸騰時	60.2	0.00	75.0	0.01	93.2	0.04	—	—
	加熱停止*	97.9	0.50	90.4	0.09	〃	〃	83.4	0.05
3 cm	沸騰時	34.1	0.00	50.5	0.00	64.3	0.00	—	—
	加熱停止*	93.8	0.33	84.4	0.06	71.4	0.01	69.0	0.01
4 cm	沸騰時	23.4	0.0	32.8	0.00	45.3	0.00	53.8	0.00
	加熱停止*	89.8	0.25	80.8	0.05	70.8	0.01	〃	〃

\*この状態で加熱停止後、いずれも余熱により軟化率が0.9に達する。

度より中心部における軟化率の経時変化を計算した。図4は計算結果の一例として3cm角試料を水量2リットルで水から加熱したときの中心温度および軟化率の変化を示したものである。ここでは試料に対し、水量が多く水温変化に及ぼす影響がほぼ無視できる場合とする。水温は測定値、試料中心温度および軟化率は計算値である。あらかじめ、試料温度の計算値については実験値との比較を行い、その差が約±1°Cの範囲にあることを確認した。図に示したように、試料中心温度は沸騰時には50°C、加熱停止時には84°Cになり、余熱によっていったん94°Cまで上昇した後、水温に遅れて緩やかに低下した。一方、軟化率は加熱停止時でも0.05とほぼ0に近い値であったが、余熱利用によって大きく増加し、最終的には最適軟化率である0.9に達した。このように試料内部温度および軟化率を求めることにより計算によって沸騰時および加熱停止時の試料内部の状態が数値的に把握できた。そこで次に水量および試料の大きさ別に同様の計算を行い、これらの条件による違いを比較した。表1はいずれも加熱停止後の余熱によって試料中心部の軟化率が0.9に達した場合の沸騰時と加熱停止時の試料中心温度と軟化率を

示したものである。加熱停止時の軟化率は0～0.68と0.9に達しておらず、いずれの条件においても煮熟不足であった。特に水量が多く試料が大きいくほど0に近く、余熱効果が顕著であった。以上、計算により沸騰までの試料内部温度の上昇および余熱利用による軟化率の増加を求めた結果、加熱停止時においてはほとんど軟化していないにも関わらず、余熱によって最適軟化率に達するまで軟化することが予測され、ゆで加熱における余熱利用の効果が非常に大きいことが明らかになった。

### 3. 加熱法別最適加熱時間

ここでは4つの加熱法別の最適加熱時間を水量および試料の大きさ別に算出した。3cm角試料を例として水量別に計算した結果を図5に示した。図は下から沸騰までの時間、沸騰継続時間および余熱時間を示している。図5の左2つの余熱ありは右2つの余熱なしよりも沸騰継続時間が著しく減少しており、余熱利用の効果が大きいことが明らかであった。この余熱利用による沸騰継続時間の短縮は水量が多くなるほど顕著であった。また水から加熱した方が沸騰から加熱したものよりもやや沸騰継続時間が短く

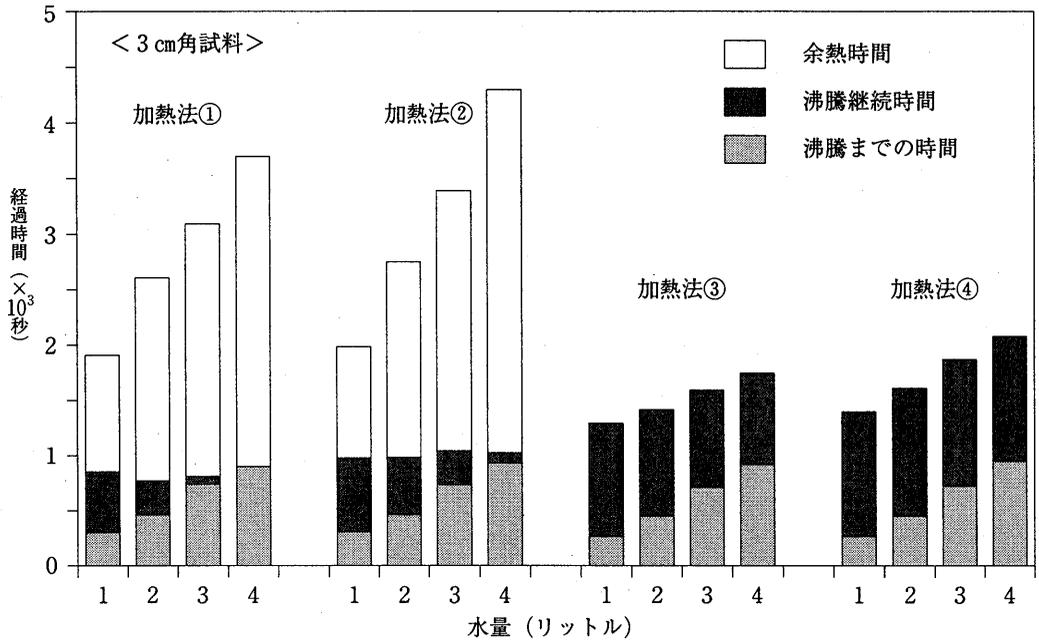


図5 最適軟化率を得るための加熱法別加熱時間

加熱法①：水から加熱し余熱利用      加熱法③：水から加熱し余熱なし  
 加熱法②：沸騰から加熱し余熱利用      加熱法④：沸騰から加熱し余熱なし

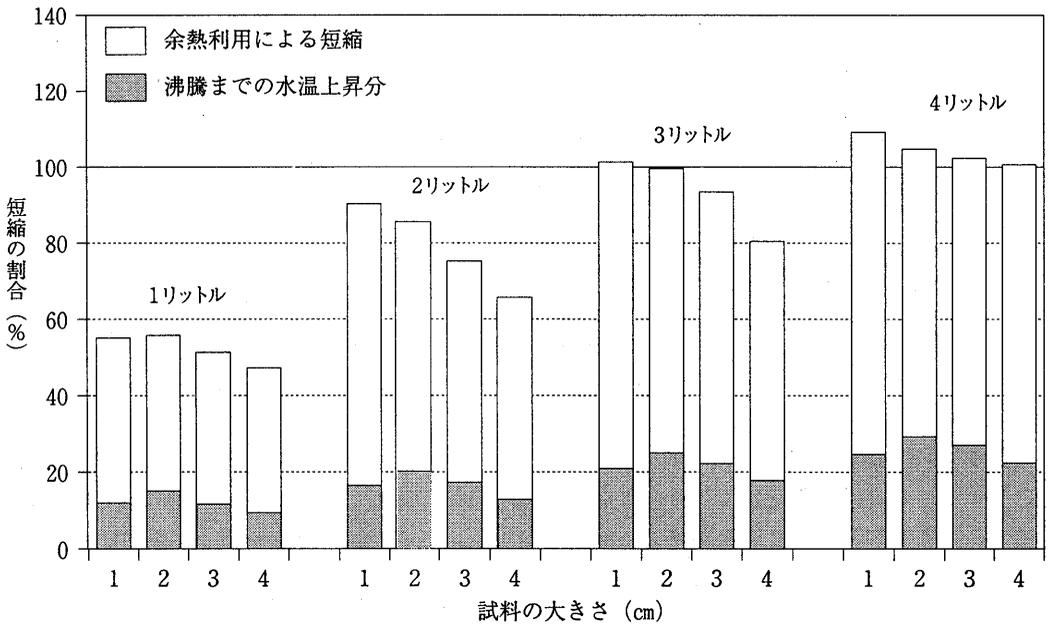


図6 水温上昇、余熱利用の沸騰継続時間短縮効果

—沸騰から加熱に対して—

$$\text{短縮の割合}(\%) = 100 - \frac{\text{加熱法①の沸騰継続時間}}{\text{加熱法④の沸騰継続時間}} \times 100$$

加熱法①、④は図5に同じ

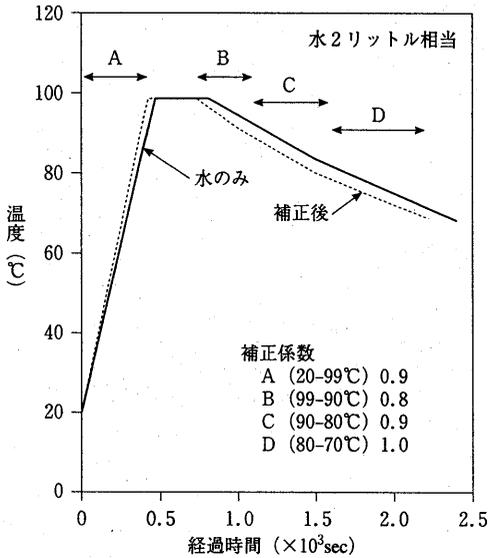
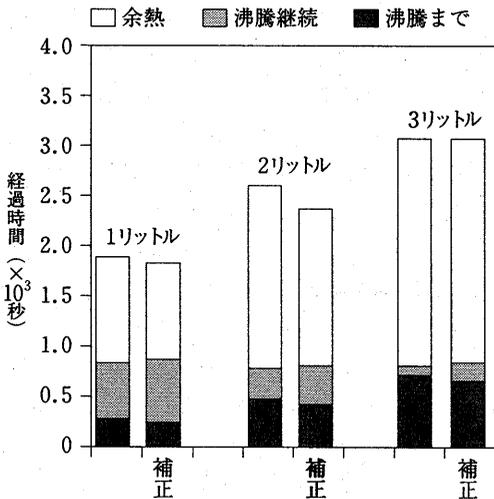


図7 各水温域の補正係数  
一試料対水の比が1:1—

図8 補正を行った時の加熱時間  
一水から余熱あり、3cm角試料—



なっており、余熱より少ないながら水温上昇期利用の効果も示された。他の大きさの試料についても同様の傾向が得られたが、沸騰継続時間短縮効果は水量、試料の大きさに依存することを認めた。

次に沸騰継続時間が最も長い加熱法④である沸騰から加熱し、余熱なしの値に対する比を用

いて余熱利用による沸騰継続時間の短縮の割合を求めた。図6は水から加熱し、余熱を利用した加熱法①における短縮の割合を示したものである。図の下が沸騰までの水温上昇による短縮分で、上が余熱利用による短縮分である。沸騰継続時間が短くなるほど短縮された割合が増加し、100%になると沸騰継続時間が0、100%を越えると沸騰前に加熱停止ということになる。たとえば、2リットル、1cm角試料の場合についてみると、沸騰継続時間短縮の割合は水温上昇期利用によって15%、余熱利用によって75%、全体で90%となった。他の水量、試料の大きさについても沸騰継続時間は50%~100%短縮され、全体的な傾向として水量が多いほど、また試料が小さいほど短縮効果が大きくなった。特に水量4リットルでは1~3cm角試料は沸騰前に加熱停止しても煮熟される結果となり、4cm角試料でも沸騰継続0、すなわち沸騰と同時に加熱停止しても最適軟化率に達する結果となった。このように水温上昇期および余熱を利用するだけで最適軟化率に達することが計算により予測されたので、ここで示された加熱時間で実際に試料を加熱して、官能検査を行った結果、平均点が $0 \pm 0.5$ といずれの条件においてもほぼ適度な煮熟状態に達していることが確認され、余熱利用の効果が明らかになった。

#### 4. 実際の調理への適用

これまでの結果より、水のみを加熱したときの水温変化を用いて、ジャガイモを4種類の加熱法で加熱した場合の最適加熱時間を比較すると余熱利用による加熱時間の短縮が著しいことがわかった。ここでは実際の調理で水に対して試料重量が多く、水のみ加熱したときの水温変化に大きく影響する場合について検討した。

図7は水量2リットルと総重量が等しく、試料対水の比が1:1で試料表面がほぼ水で覆われた状態であるときの水温変化を示したものである。図に示したように、水のみの場合よりも

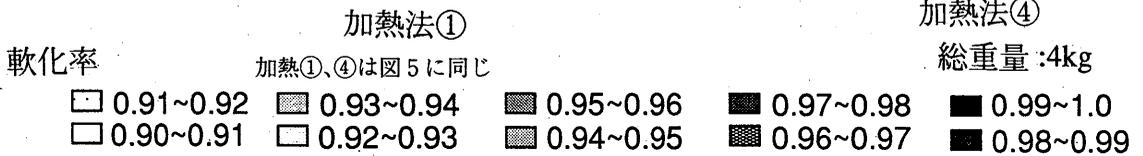
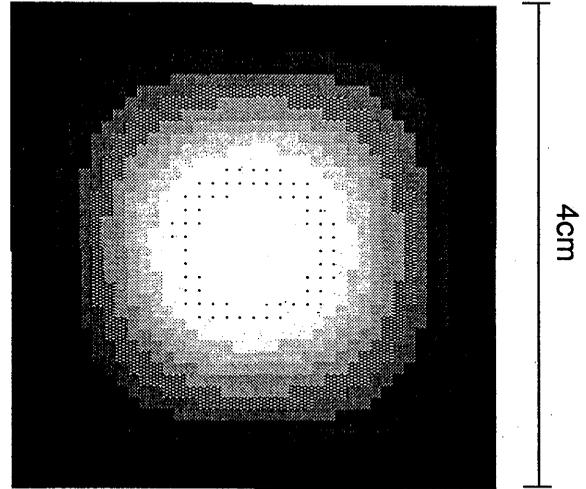
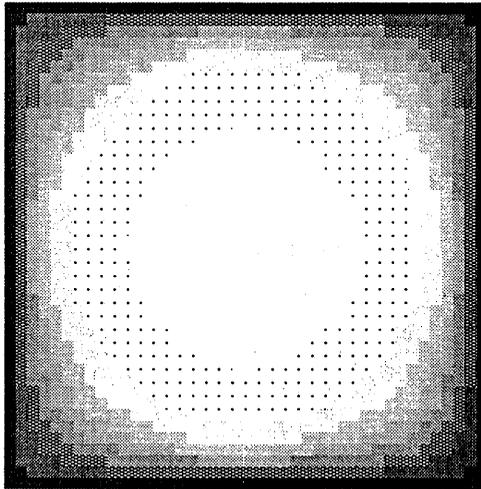


図9 4 cm角試料の軟化率分布の断面図

試料が1:1まで入ったときの方が沸騰までの時間が短く、水温上昇が速かった。また、加熱停止後の水温降下も試料の入った方が速くなる傾向がみられた。そこで試料投入による影響を示す補正係数が必要であると考え、A~Dの各水温域を通過する時間の比をとり、これを補正係数とした。補正係数は水温域が20-99℃の水温上昇期においては0.9、99-90℃の水温下降期においては0.8、90-80℃においては0.9、80-70℃においては1.0となった。これらの補正係数を用いて4種類の加熱法について加熱時間の計算を再度行い、前出した結果と比較したところ、補正係数を用いたことによる影響が最も大きかったのは水から加熱し余熱ありの加熱法①であった。図8にその計算結果を水量別に示した。図に示したように、補正後は沸騰までの時間がやや短く、沸騰継続時間がやや長くなった。このように試料と水の比が大きい場合でも、実験により得られた水温の補正係数を用いることで最適加熱時間を算出できることが示された。以上、最適加熱時間の予測法を水温上昇期、および加熱停止後の水温下降期にも適用して余熱利

用の効果が数値化できることを明らかにした。最後に加熱法の違いが試料内部の軟化率の分布にも影響することが予測されることから、余熱利用の効果が仕上がり状態の均一さにどのように関わるかについて検討した。図9は水から加熱し、余熱ありの加熱法①と沸騰から加熱して余熱なしの加熱法④で4 cm角試料を加熱したときの、試料中心部の軟化率の分布を示したものである。加熱時間はいずれも試料の中心部が最適軟化率0.9になるまでとし、計算により温度分布より軟化率の分布を求めた。図は中央の白い部分が軟化率0.9~0.93、外側にむかって0.1ごとに色が濃くなっていき、外側は0.99~1となっている。図9に示したように左側の加熱法①と右側の加熱法④の軟化率分布の差は明らかであり、加熱法①の方が加熱法④より試料の外側と内部の差が小さく、均一であった。加熱法④では周囲部の軟化率が非常に大きく、煮熟しすぎによる煮くずれが起ること、また中央部の適度な状態の部分が少なく、外側の煮熟しすぎとの差が大きいことが予測された。これに対して、加熱法①では適度な煮熟状態が広範

囲にわたっており、外側も軟化率が0.99に達しておらず、煮崩れのない均一な仕上がり状態であることが予測された。この仕上がり効果は官能検査により確認された。

以上、本研究により最適加熱時間の予測法を適用し、従来経験的に知られていた加熱停止後の余熱利用の効果を数量的に表現することが可能になった。このことは食品の調理加工における自動制御ならびに省エネルギーという問題に対して貢献するものであると考える。

本研究の遂行にあたり、計算処理の上で多大な御協力を頂きました東京電力株式会社AI研究室の中村文子氏に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 香西みどり、島田淳子：日食工誌、**32**, 360 (1985)
- 2) 松裏容子、香西みどり、畑江敬子、島田淳子：日食工誌、**36**, 97(1989)
- 3) 香西みどり、中川弥子、谷澤容子、畑江敬子、島田淳子：日食工誌、**39**, 41(1992)
- 4) 香西みどり、長尾慶子、松裏容子、平野悦子、島田淳子：家政誌、533(1986)
- 5) Paulus, K. and Saguy, I.:J.F00d Sci., **45**, 239(1980)
- 6) Harada, T., Tirtohusodo, H. and Paulus, K.:J. F00d Sci., **50**, 459(1985)
- 7) Huang, Y.T. and Bourne, M.C.:J.Tex.Stud., **14**, 1(1983)
- 8) Bourne, M.C.:J.F00dSci., **52**, 667(1987)
- 9) Kubota, K., Oshita, K., Hosokawa, Y., Suzuki, K. and Hosaka, H.:J.Fac. Fish Anim. Husb., HiroshimaUniv., **17**, 97(1978)
- 10) 久保田清、高崎化掘る、藤本真紀子、鈴木寛一、保坂秀明：日食工誌、**27**, 157(1980)