

実習教材化を目的としたスポンジケーキの基礎的研究

広島県立河内高等学校 白土弘子
広島大学教育学部 井川佳子

キーワード：調理実習教材，スポンジケーキ，卵泡の安定性，オープンの特性

【要旨】

スポンジケーキ調製に関わる基本的条件について，教材化の視点から検討することを目的に実験を行い，次のような結果を得た。1. 卵泡の安定性は砂糖濃度と温度に影響され，安定度の高いものは糖濃度が高く低温であった。また糖濃度34%のケーキは良好な外観を示した。2. バッター粘度を上げないためには，小麦粉の小麦澱粉置換が有効であった。3. 焼成過程の分析から，膨化開始後ケーキ構造形成までの期間（ケーキ内層温度で40-95℃）の重要性が示唆された。4. ケーキ焼成時のオープンの特性は，ケーキ構造形成に要する時間で見積り可能であった。

このような結果と先行研究結果を基に，調理実習に適したスポンジケーキの製法について言及した。

1. はじめに

調理実習という学習方法は，中学校や高校の生徒にとって調理を学ぶという目標到達に最も効果が大きく，生活力の獲得に欠かせないものと考えられている¹⁾。そこで活用される教材には，知識や技能の伝達に相当であるだけでなく，学習者にとって魅力的である，作る意欲を喚起するといった側面も重要である。調理実習教材として望まれる条件は，前提としての発達段階に応じた適時性の他に，1. 興味関心を引く，2. 日常的食品素材を用いる，3. 調理過程の科学的根拠が理解しやすい，4. 創造性を持ち自己表現が可能である，5. 実習後の実践意欲につながる，の5つが挙げられよう。

スポンジケーキの調製は上記5点の条件を満たす題材の1つであり，男女を問わず興味を引くという点でも，今日的教材として利用価値が高い。にもかかわらず，授業に活用されることが比較的少ない理由は，自然膨化法によるスポンジケーキでは製品の外観や触感が調理操作の適否によって大きな影響を受け，微妙な調整と注意が必要ないわゆる難しい調理の一つであること，またそれ故，指導者側の知識や経験の豊富さが要求されることが挙げられる。一方，スポンジケーキの性質や製法の調理科学的研究は数多く行われ²⁾，一部では教材を意識した報告³⁾もなされている。しかし，基本的にこれらの成果を教材として生かすための努力は，授業者側に委ねられているのが現状である。研究成果の教材としての活用を促進するためには，対象とするものの性質を一定条件下で詳細

に調べるという研究的視点だけでなく、実習時の室環境との関係や、未熟な操作の影響などを視野に入れた実用的な検討が不可欠である。

以上のことから、この研究ではスポンジケーキの調製に関わる条件を教材化の視点から検討することを目的として実験を行うとともに、先行研究の成果も取り入れて、教材に適したスポンジケーキの製法についても言及することにした。

調理実習において、スポンジケーキの出来上りを左右する因子のうち重要なものは、材料配合割合、良好な卵泡の形成とその維持、粉材料混合時の泡破壊防止、適切な焼成条件の設定である。この内、材料配合割合については既に教材として検討した報告がなされている³⁾のでこれを利用した。卵泡の形成方法については、電気ハンドミキサーの利用が一般的であり、この方法によると出来上りを左右するような影響が現れにくい。そこで卵泡形成方法に関する検討は予備実験のみに留め、以下の実験では電気ハンドミキサーによる方法を用いた。従って本実験では、卵泡の安定性に関わること、粉材料の混合に関わること、焼成条件に関わることの3点を主な検討項目とした。

2. 実験方法

1) 材料と標準配合割合

市販鶏卵（産卵後 1週間以内）、グラニュー糖（三井製糖）、小麦粉（水分11.7%、日清製粉、薄力粉「バイオレット」）、小麦澱粉（水分10.3%、三和澱粉）、コーンスターチ（水分14.5%、日本食品化工）を用いた。標準的な材料の配合割合は越知らの報告⁴⁾を参考にして、卵白23.4%、卵黄13.0%、グラニュー糖33.9%、小麦粉24.5%、水5.2%とした。

実験の目的によって、砂糖は全体の20-34%の範囲で変化させた。また小麦粉を澱粉と置換した場合にも、小差なので水分量の調整を行わなかった。

2) バッターの調製

ケーキ焼成前の流動性のある生地をバター（batter）と称するが、これの調製方法は次のとおりである。卵白、卵黄、グラニュー糖、水をガラス製ボールに入れ、15℃の恒温水槽中に置き、品温を17℃まで下げた後、電気ハンドミキサーで泡立てた。ミキサーの目盛は最高速で、7-10分を要した。卵泡の比容積が $4 \pm 0.25 \text{cm}^3/\text{g}$ であることを確認し、4)の実験に用いた。この卵泡に4回ふるった所定量の小麦粉等を3回に分けて加え、手早く切るように混ぜ合わせてバターとした。

3) 焼成方法

実験の目的に応じて、表1に示すようなケーキ型、個数、オープンにより最適の出来上がりとなるようにケーキ焼成温度と時間を変化させた。なお庫内温度の設定に当っては、実測温度がほぼ目的の温度になるように、オープン付属の温度目盛を調節した。

4) 卵泡の離水量と粘度

砂糖量を変化させて調製した卵泡を、環境温度を15-30℃の範囲に置いて、泡の安定度の指標となる離水量と、粘度を測定した。

目盛り付きスピッツ型試験管に卵泡10mlを計り取り、所定の温度環境中に垂直に立てて放置した。

先端部分に排出される液量を30分毎に読み取り、離水量とした。

卵泡300mlを直径50mmのトルビーカーに入れ、B型粘度計（東京計器）を用い、ローター No. 4, 30rpmの条件で回転開始後30秒の値を読み取り、見かけ粘度に換算した。

5) バターの粘度

小麦粉を澱粉に置換した場合のバター粘度を4)と同様の方法で測定した。ただしこの場合の測定温度は20℃とした。

6) 焼成中の温度と高さの変化

この測定は、表1焼成方法一覧に示した番号2, 3の場合に行った。

ケーキ型の内側に1mm方眼紙を張り付け、30秒毎にケーキの高さを読み取った。またサーミスタ温度計（テクノ・セブン）を用い、円形ケーキ型の場合は中心部で底からの距離1cmの点と、型枠より約1cm内側で底からの距離1-1.5cmの点の2点、シート型の場合は中心部で底から0.5cmの1点の温度を、10秒毎に測定した。

7) ケーキの評価

焼成したスポンジケーキは室温になるまで放置し、型から取り出して重量を測定した。一定量の容器に、ケーキをナタネ種子と共に埋め込む前後の容量差からケーキ体積を算出し、比容積を求めた。ケーキは中心を含む軸にそって切断し、その断面を複写して組織の状態や外形を比較した。

表1 焼成方法一覧

番号	ケーキ型と個数	バター総量	オーブンの種類	焼成温度と時間
1	セルクル型* 4個 直径 90mm 高さ 50mm	254g	電気オーブン(A)	170℃, 15分
2	円形ケーキ型 1個 直径 180mm 高さ 50mm	288g	電気オーブン(A) ガスオーブン(B) ガスオーブン(C)	150-200℃ 27-38分
3	シート型 1枚 縦 180mm 横 220mm 高さ 25mm	288g	上に同じ	150-200℃ 10-17分

* 底のない円形ケーキ型

3. 結果と考察

1) 卵泡の安定性

材料の中でも砂糖量の変化は、ケーキの出来上がりに最も大きな影響を与えることがすでに報告されている⁴⁾。ケーキ中の砂糖は甘味料としての役割以外に、特に卵泡の安定性と関わって重要な因子である。また同時に温度は砂糖を含む卵溶液の粘度を変化させる結果、卵泡の安定性に影響を与える。従って砂糖濃度と温度の2因子と卵泡の安定性との関係を把握することが基本的に重要である。表2に環境温度と砂糖量の異なる卵泡の離水量を示した。糖濃度が低いほど、また温度が高いほど離水量が増し、泡が不安定であることが分かる。

卵白泡の構造は、表面にアルブミンを吸着した3-7 μm の液体膜に囲まれた空気泡であると考えられている。液体膜の部分は、表面のアルブミン吸着層とそれにはさまれた内液層より成り、この内液層の電気的性質と粘性が泡の安定性を左右すると考えられている⁵⁾。砂糖は主に水を構造化することによって内液層の粘度を上昇させ、泡から液が排出することを妨げる。この実験で用いた卵泡は卵黄を含んでいるので、さらに複雑な液層構造を持つが、基本的には卵白泡と同様の機作で砂糖による泡の安定化が行われると推測される。また温度の影響についても、高温ほど内液層の流動性が増加し泡が不安定になるためと解釈できる。

表2 糖濃度の異なる卵泡の離水量

卵泡の糖濃度	温度(°C)	放置時間			
		30分	60分	90分	120分
20%	15	0.20	1.05	1.48	1.88
	20	0.28	1.08	1.55	1.75
	25	0.81	1.48	1.98	2.13
	30	1.08	1.68	2.18	2.33
25%	15	0.10	0.65	1.20	1.63
	20	0.22	1.03	1.51	1.81
	25	0.23	1.16	1.63	1.88
	30	0.65	1.19	1.73	2.00
30%	15	0.02	0.10	0.34	0.74
	20	0.04	0.20	0.67	1.13
	25	0.05	0.41	0.98	1.34
	30	0.07	0.53	1.11	1.55
34%	15	0.00	0.06	0.16	0.39
	20	0.04	0.12	0.36	0.68
	25	0.04	0.21	0.63	0.98
	30	0.06	0.22	0.66	1.01

注：数値は4試料の平均値，単位はmlである。

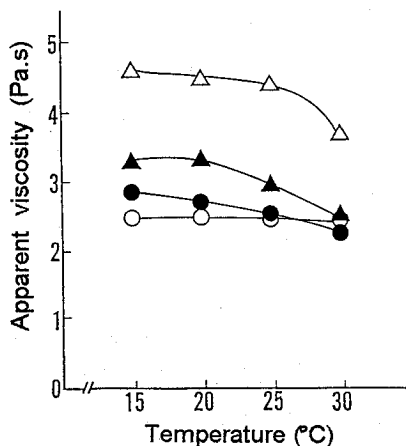


図1 砂糖濃度と温度の異なる卵泡の見かけ粘度
糖濃度20%：○，25%：●，30%：▲，34%：△

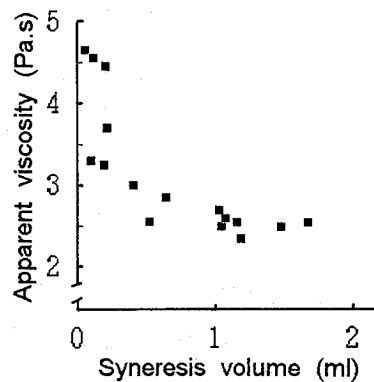


図2 卵泡の見かけ粘度と1時間後の離水量との関係

図1に示すように糖濃度が高くなると、概して卵泡全体の粘度が高くなった。また糖濃度30%と34%の間には比較的大きな差が見られ、25%以上では高温ほど粘度の低くなる傾向が見られた。卵泡の粘度と泡の安定性との関係は考慮すべき因子が多く複雑な現象の結果なので、粘度のみでは直接的な指標になり難い。そこで1時間後の離水量と粘度の関係を描いてみると、図2に示すとおりである。この図から3 Pa.s 以上の見かけ粘度を持つ泡は、離水量が少なく安定性が高いことが分かるが、一方で粘度が直接に安定性を説明しないこともまた明らかである。実用的にはこの図から安定度の高い範囲を読み取ることができ、15-30℃における糖濃度34%と15-20℃における糖濃度30%の卵泡がこの点について優れていた。

2) 砂糖量とケーキの品質

図3に砂糖濃度を变化させたケーキの横断面を、図4に比容積のデータを示した。糖濃度25%以下では中心部のへこみが大きく、特に20%では気泡が大きくなりそれが潰れている様子が観察された。糖濃度30%以上のケーキ組織は、気泡が細かくよく膨化していたが、全体の形状や比容積の点で明らかに34%が優れていた。

このようなケーキ組織の違いが、1)で述べた卵泡の安定度と関連していることは明らかである。と同時に、安定性の高い卵泡を調製することがケーキ作りにおける重要なポイントであることを示している。

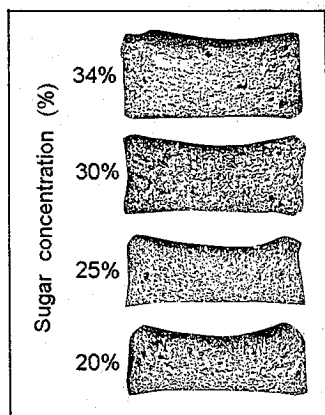


図3 砂糖濃度の異なるケーキの横断面

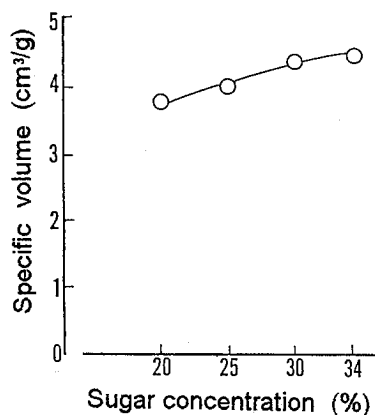


図4 砂糖濃度の異なるケーキの比容積

3) バターの粘度

標準材料配合における小麦粉を、小麦澱粉やコーンスターチに置換した場合の20℃におけるバター粘度を図5に示した。卵泡の粘度は4.6Pa.s 前後であるが、これに小麦粉を加えると3倍程度粘度が高くなる。一方、小麦粉を澱粉に代えると約5.8Pa.s となり、粘度の上昇が抑えられる。このことから、小麦粉に含まれる澱粉以外の成分が主に粘度上昇に関わっており、それは吸水性タンパク質やペントザンなどであろうと考えられる^{6),7)}。

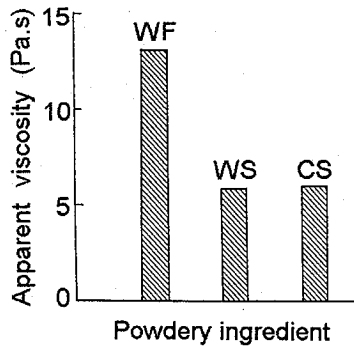


図5 粉材料の異なるバターの見かけ粘度
WF：小麦粉，WS：小麦澱粉，
CS：コーンスターチ

バターの粘度上昇は焼成初期の膨化を抑えるだけでなく、粉を混ぜ込む際の操作性と元々不安定な卵泡の攪拌による崩壊程度に影響する。データは省略するが、小麦粉を部分的に澱粉に置換したバターは、その比率に応じてほぼ直線的に粘度は低くなる。攪拌による卵泡破壊を少なくするためにはバターの粘度を上げないことが必要であり、それには小麦澱粉との部分置換が有効である。

4) 焼成時の変化

円形ケーキ焼成時における品温と高さの変化の1例を図6に示した。図に現れた温度変化に従って、ケーキの焼成過程を整理すると、温度上昇の速い周辺部が初期の急激な上昇を終えるまで、中心部の温度が周辺部の温度に追いつくまで、焼成終了までのように3つに分けることができる。これを仮に焼成第1期、第2期、第3期とすると、第1期の終点はいずれの場合もケーキ外周部の温度が80-85℃に到達した点に相当し、第2期の終点では品温が95℃以上になる。第1期はケーキの膨化が著しく、その終点では最大膨化時の80-90%の高さにまで達する。第2期はケーキの最大膨化期と収縮の初期を含み、第3期に入って4-6分でケーキの収縮は停止した。我々は示差走査熱量分析によって、このようなバターの熱変性は、90℃を中心とした83-96℃の温度帯で生じることを明らかにしている⁸⁾。この温度帯はケーキ焼成過程の第2期に該当し、この時期に卵蛋白質の熱変性と澱粉の糊化が同時に起こり、ケーキ組織の硬化、膨張停止とそれに続く収縮が始まると考えられる。このように、第1期と第2期にケーキ構造の主要部分が出来上がることから、この期間の温度履歴の重要性が示唆される。

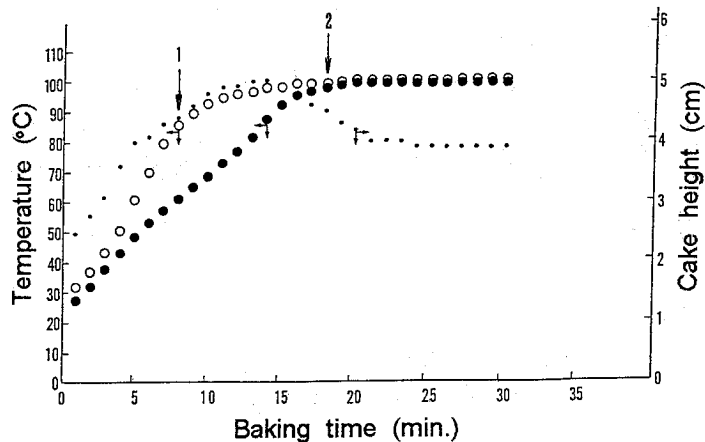


図6 ケーキ焼成中の温度履歴と高さ変化の一例
●：中心部の温度，○：周辺部の温度，・：ケーキの高さ
矢印1と矢印2はそれぞれ第1期と第2期の終了点を示す

表3 3種のオープンにより異なる型と設定温度で焼成したケーキの加熱状態と品質

オープンの種類 と庫内容積()	設定 温度 (℃)	円形ケーキ				シート型ケーキ			
		最大膨 化(分)	2期終 点(分)	ケーキ 高さ(cm)	ケーキ* 評価	最大膨 化(分)	2期終 点(分)	ケーキ 高さ(cm)	ケーキ* 評価
電気オープン(A) 自然対流式 壁面ヒータ (21.3ℓ)	150	22	24	4.8	10	6	10	2.1	8
	160	17	21	4.5	12	5	9	2.0	12
	170	16	19	4.5	13	5	8	2.1	13
	180	13	17	3.9	12	5	8	2.0	12
	190	13	15	3.5	9	5	7	1.9	13
	200	9	15	3.5	8	5	7	1.4	11
ガスオープン(B) 自然対流式 (17.8ℓ)	150	24	26	4.4	7	11	13	2.5	7
	160	18	23	4.5	12	10	10	2.4	9
	170	17	21	4.1	14	9	9	2.3	11
	180	15	19	4.3	12	8	8	2.6	12
	190	15	18	4.5	12	7	7	1.9	12
	200	12	16	3.8	10	5	7	2.0	11
ガスオープン(C) 自然対流式 (35.5ℓ)	150	19	23	5.8	7	9	15	2.3	7
	160	17	20	5.6	12	9	12	2.4	10
	170	15	17	4.5	13	8	10	2.2	11
	180	14	16	4.5	14	7	9	2.5	12
	190	13	15	4.8	11	6	7	1.8	12
	200	10	13	4.4	7	5	6	1.7	12

*ケーキ評価は組織の均質性、膨化の程度、外形のバランスの最良を5として採点した合計である。

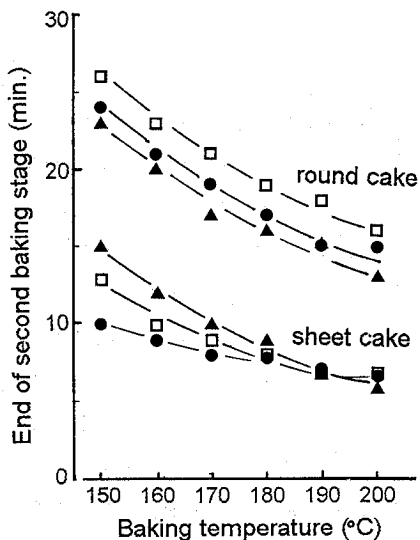


図7 オープン設定温度と第2期終了時間の関係

- : 電気オープン(A),
- : ガスオープン(B),
- ▲ : ガスオープン(C)

5) ケーキの形状とオープンの特性

オープンの特性を食品の調理中の状態や出来上がり
を指標として示すことは、最も実用的な方法であろう。
そこで、ケーキ焼成に関わる3種のオープンの特性を、
ケーキの温度履歴と出来上がり状態から比較検討した。
表3に最大膨化に要した時間、焼成第2期の終了時間、
ケーキの出来上がり高さ、ケーキの評価を示した。

最大膨化時間や第2期終了時間には、各オープンの
特徴が見られた。ガスオープン(B)はいずれのケーキ
型でも温度上昇が遅れる傾向にあった。シート型ケー
キでは電気オープン(A)の温度上昇が速かった。ケー
キ焼成に関わるオープンの特性が第2期終了時間に現
れていると考えられたので、設定温度との関係を図7
に描いた。

図7から明らかなように、円形ケーキとシート型

ケーキではオープンの加熱能が異なっていた。円形ケーキでは、設定温度に対する第2期終了時間を結んだ曲線がオープン間でほぼ平行になり、加熱能の高い順に(C) > (A) > (B)であった。一方シート型では、設定温度によって第2期終了時間が円形ケーキと同程度変化する(C)、変化の小さい(B)、わずかな変化しか示さない(A)の3種となった。

バターは同量であるから、円形とシート型の主要な違いは表面積である。シート型ケーキの焼成時の高さは円形の約1/2となり、表面積は1.4倍強となる。オープン庫内における食品への熱の伝達は、空気の対流、ヒーターや壁面からの放射、金属トレイからの伝導に依るが、この実験では同じトレイを使用したので、伝導熱の影響は無視できる。またいずれも自然対流式であるので、空気流速の違いを考慮しないとすると、受熱面積の広いもの即ち表面積の広いものほど、放射熱の効果が大きく現れることになる。

渋川の報告⁹⁾に見られるように、自然対流式ガスオープンの複合熱伝達率は17kcal/m.hr.℃で、放射伝熱の割合は45-50%、一方ヒーター付電気オープンでは21kcal/m.hr.℃で、放射伝熱の割合は75%と算出されている。ここで用いた電気オープン(A)のヒーターは渋川の報告にあるものと同じではないが、一般にヒーター付電気オープンの放射伝熱の割合はガスオープンの1.5倍程度高い。以上のことから、シート型ケーキに対する(A)の加熱能が設定温度にわずかしき依存しないことには放射電熱割合の大きさが関与しており、第2期終了時間に現れた違いは、オープン間の放射電熱量の違いを反映していると考えられる。逆に表面積の小さい円形ケーキでは、放射電熱の影響が比較的小さく、設定温度の違いがどのオープンにも同じように現れたと考えられる。

円形ケーキに対する各オープン間の加熱能の違いは、ケーキ表面に伝えられる時間当りの熱量の違いを反映するはずである。図7から、(C) > (A) > (B)の順に時間当りの供給熱量が大きいと推測できるが、この順序はオープン容積の大きさ(表3参照)と対応しており、蓄熱した空気量の多少が関与していると考えられる。

円形ケーキの評価は、いずれのオープンにおいても160-180℃で焼成された場合に良好であると判定され、(B)は190℃でも良好な出来上がりとなった。またシート型では、180-190℃で良い評価が得られたが、(A)では160、170℃でも良好であった。シート型の場合は先に述べた放射伝熱量との関係でケーキの温度上昇速度が決り、今回のデータから考えると9-7分程度で中心温度が95℃に到達すること、換言すれば比較的短時間で焼成できることが、良好な出来上がりに寄与していた。概略の傾向で言えば、円形ケーキは初期の温度上昇が早過ぎないこと、シート型ケーキでは遅過ぎないことに留意する必要がある。

以上のようにケーキの形状の違いはオープンの特性と関連して、焼成条件にかなりの違いをもたらすことが明らかになった。また、第2期終了時間はオープンの特性評価に利用可能であることが示された。調理実習に際して、使用するオープンの特徴を食品の調理性能として把握しておく重要性をこの実験も示しているが、どのような把握方法が適当であるかは、さらに幅広い検討が必要であらう。

4. まとめ

ここでスポンジケーキの製法と留意事項について、実験結果と先行研究報告を基にまとめてみる。

1) 材料配合割合

越知らの報告³⁾にも示されるように、スポンジケーキの材料比率は、全卵29-37%、砂糖41-33%、小麦粉25%、水5%程度が良好な出来上がりとなる。粉の増量は形の点では評価を下げないが、味の点で劣るものになる。水の増加は必ずしも悪い評価と結びつかず、他の材料とのバランスで決る。卵と砂糖は前述のような比率で変更することが可能であるが、砂糖は本実験で明らかのように、泡の安定性と膨化に関わるので、33%より小さくしない方が良い。

小麦粉と卵泡を合せた時に生じる粘性は小さい方が取り扱いやすい。小麦粉の30-50%を小麦澱粉に代えるとこの点で有効であるだけでなく、食味の点でも良好となり、推奨できる。

2) バッター調製上の留意点

調理実習指導を念頭に置いた場合の留意点を順を追って示すと次のようになる。

1. 卵泡形成時の品温が15-20℃に、またその後の卵泡やバターの商品温が20℃程度に維持できるよう卵や道具の温度に注意する。泡立て操作によって品温は3℃前後上昇する。
2. しっかりとした泡を形成させる。電気ハンドミキサーの高速で、比容積が4前後、細かい均質な泡となるようにする。
3. 小麦粉は2回以上ふるう。泡を潰さないよう、練らないように混ぜる。
4. 卵泡やバターの状態で長く置くことは避ける。
5. 全体として室温は20℃前後が望ましいが、悪条件下では品温の上昇を防ぐようボールやケーキ型の温度にも留意する。

3) 焼成条件の設定

実験結果で示したように、オーブン毎に特徴があるので、実際に設定温度を変えて現物を試作した方が良い。オーブン付属の温度設定装置には、実際の温度と差の見られる場合があるので、あらかじめ別の温度計による実測を行ない、そのずれを知って対応することが望ましい。また十分な予備加熱は、加熱時間設定の基礎条件として重要である。

今回の実験に用いたものと同様の自然対流式オーブンであれば、300g程度のバターで直径18cmケーキ型の場合は170℃で32-35分、同量のバターをシート状にする場合は190℃で10分、が標準となる。空気流量の多い強制対流式オーブンでは、より低温或いは短時間の設定条件になる可能性が大きいので、注意が必要である。

謝辞

この実験の一部は、星野曜子さんの協力を得て行いました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 武藤八重子「食物の授業」P.12, 家政教育社 (1989)

- 2) 松井宣也 “ケーキ研究の現況” 調理科学, **18**, 203-221 (1985)
- 3) 越知知子 “教材研究スポンジケーキ” 調理科学, **22**, 272-277 (1989)
- 4) 越知知子, 吉川誠次 “スポンジケーキの品質に及ぼす材料配合比の影響について” 家政誌, **20**, 151-157 (1969)
- 5) 藤岡利子, 松本幸雄 “鶏卵白泡沫の安定性に対するレオロジー的評価の試み” 調理科学, **27**, 7-13 (1994)
- 6) S.L.JELAKA and I.HLYNKA “Effect of Wheat-Flour Pentosans in Dough, Gliten, and Bread” *Cereal Chem.*, **49**, 489-495 (1972)
- 7) 藤井淑子, 団野源一 “小麦デンプンで調製したスポンジケーキの特性について” 日食工誌, **35**, 684-690 (1988)
- 8) 井川佳子, 白土弘子 “澱粉置換率の異なるスポンジケーキの性質” 家政誌, 投稿中
- 9) 渋谷祥子 “加熱調理機器の種類とオーブンの加熱能” 調理科学, **22**, 108-113 (1989)

(1994年9月1日受理)

[Abstract]

Basic Studies on Sponge Cake Making as a Teaching Material of Food Preparation

Hiroko Shiratsuti and Yoshiko Ikawa

The purpose of this study is to investigate about the basic condition for sponge cake making usable as a teaching material of food preparation. The results were as follows : 1. Egg foams were stable under high concentration of sucrose and low temperature. The cake with 34% sucrose showed a good appearance. 2. Substituting starch for wheat flour was effective to keep low viscosity of batters. 3. The data for the baking process indicated the importance of the first and second stages in baking, which covered the period from the initiation of cake expansion to the end of making cake structure (from 40°C to 95°C in cake layer). 4. The characteristic of each oven for cake baking were evaluated by the end of the second baking stage.

Based on these results and those of the previous studies, we described that suitable cooking method can be used as a teaching material of food preparation.