
 総 説

ケーキ焼成のメカニズム

水 越 正 彦

ケーキと陶器は共通点が多い。ケーキはケーキ生地をオープンで焼いてつくられる。陶器は土を窯で焼いてつくられる。ケーキと陶器は日常品であるにもかかわらず、芸術的要素も合わせ持ち、人類の文化生活の一部を形成している。陶工の故加藤唐九郎氏の次の言葉は、陶器・やきものをケーキ、土をケーキ原料、窯をオープンと言い換えれば、そのままケーキの研究者・技術者にも共感できる、“焼く”こと一般に当てはまる真理を含んでいると考えるので、あえて引用させていただく。『陶器ばかりはまったく土と焼き方じゃ。結局は焼きが一番難しい微妙なんだ。やきものを窯焼きというくらいだからね。窯の焼き方が上手なら陶工として秀れておるけれども、いかなる条件がそろっていても窯の焼き方が下手だったら物にならない。……やきもの作りの中で、一番魅力を感じ、興奮するのは、やっぱり窯を焚くことだね。焼きあげて窯から出すときは、予想もしなかった結果がでてくるんだ。喜ぶことよりも、悲観することのほうが意外に多い。科学データをそろえなくとも、勘でだいたいわかるのだけれども、こちらの思うことと反対にくるからね。また、同じ条件の下に焼いても、決して一樣にならず、人それぞれの天分によって、違ったものになるのもおもしろい。』¹⁾ 芸術家のするどい感性が、焼くことの本質を見事にとらえた言葉である。ケーキ製造においても、古来より、ケーキ職人、シェフという、どちらかというとな芸術家肌の人達によって、ケーキ製造技術が伝えられてきた意味が理解できる。

陶芸と同じくケーキにおいても、焼成工程 (Baking Process) はケーキ製造において最も重要な工程にもかかわらず、長い間、ブラックボックスであり、科学的説明がなされていなかった分野である。その原因として、ケーキ焼成工程では温度、膨脹、停止、泡沫構造、組織

形成、熱変性、風味形成、褐変反応等の物理化学的変化がダイナミックに、しかも協同的に同時進行する上に、理想系からあまりにもかけ離れている複雑な系であることをあげることができる。

本報においては、界面科学・コロイド科学的観点という新しい切り口でケーキ焼成を見た場合の研究成果について概説する。ケーキ焼成工程において、ケーキ生地はケーキに変換される。ケーキ生地及びケーキは共に、コロイド科学的には多成分不均一分散系とも定義することができる。ケーキ生地とは、水、卵白、砂糖の水溶液からなる連続相 (分散媒) 中に、気泡、小麦粉、卵黄、油脂等の粒子が不連続相 (分散質) として分散している、泡、エマルジョン、サスペンションの混合系と見ることができる。一方、焼成ケーキは変性タンパク質、変性澱粉等の天然高分子物質で骨格構造が構成された連続相中に、気孔が不連続相として分散した固体泡、固体コロイドと称される多孔体と見なすことができる^{2,3)} (図-1)。ケーキの焼成工程中では、熱が加わることによって、ケーキ生地の連続相と不連続相がお互いに相互作用をしながら、その構造を変化させて、ケーキに変換していくことになる。よって、まず焼成工程中の物理化学的变化について次の順序で解説を進めることにする。

- (1) 連続相に関する現象
- (2) 不連続相に関する現象
- (3) 連続相と不連続相の協同現象

1. 連続相に関する現象

ケーキ焼成工程中に流動状のケーキ生地は、徐々に組織形成 (Structural Development) を行って、最終的には固体のケーキに変化する。この焼成工程中のレオロジー的研究に関して多くの報告がある⁴⁾。小麦粉のドウ物性試験機であるファリノグラフ、ビスコグラフを転用して、加熱中のケーキ生地の物性変化が、Anker⁵⁾、

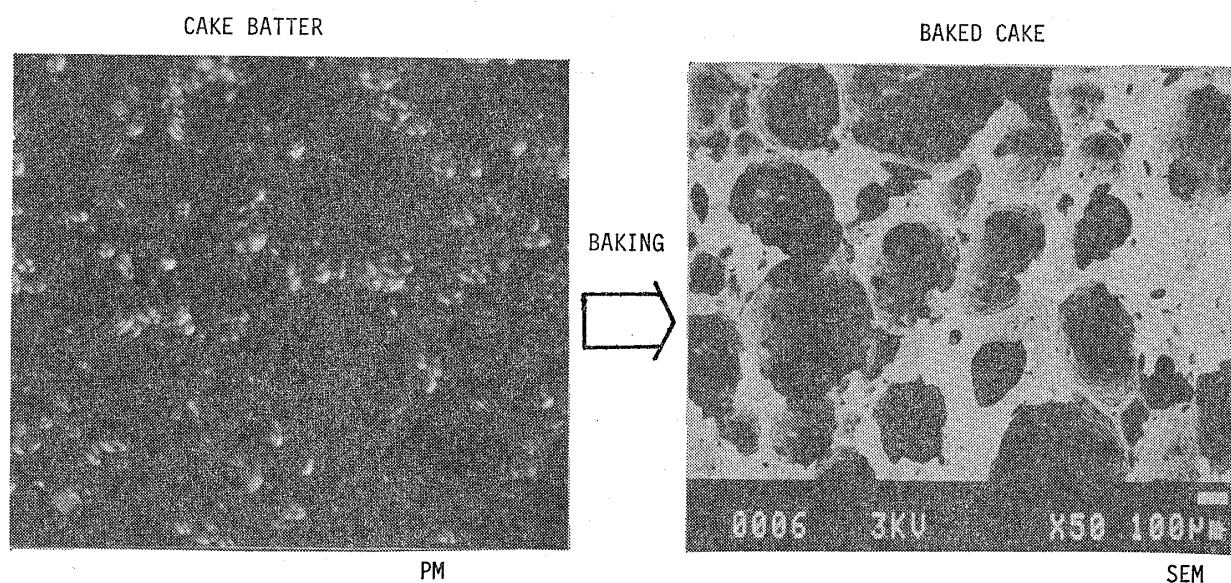


図 1. ケーキ生地とケーキの微細構造

左; ケーキ生地の偏光顕微鏡写真

右; ケーキ断面の走査型電子顕微鏡写真

Miller⁶⁾, Gaines⁷⁾ 等によって行われている。Voisey⁸⁾, Paton⁹⁾ 等は, 加熱中のケーキ生地に沈めたブレードを少しずつ引き上げた場合に, ブレードに作用する凝集力を測定して, ケーキ焼成工程中における各ケーキ原料の組織形成への寄与に関するユニークな研究を行った。回転粘度計によるケーキ生地昇温過程中的の粘度変化は, 筆者らにより報告されている¹⁰⁾。最近では, ケーキ生地の粘弾性的性質を測定した研究が, Shephard¹¹⁾, Ngo^{12,13)}, 筆者ら¹⁴⁾ によって始められている。

筆者は, 従来とかく経験が支配するケーキ分野を, より普遍性のある学問分野にする必要を痛感している。まずその一環として, ベーカリー分野で通常使用されている実用試験測定値ではなくて, ユニバーサルで普遍性を有する物性値である, 剛性率 (Shear Modulus) と複素弾性率 (Complex Modulus) をケーキ系に導入した。剛性率測定により, ケーキ生地は 85°C で流動性を失い $2 \times 10^4 \text{ dyn/cm}^2$ の値を示し, 90°C では 2.4×10^5 , 95°C では 5.5×10^5 , 焼成終了時点では $6.7 \times 10^5 \text{ dyn/cm}^2$ の値の構造を形成することが明らかになった¹⁵⁾。また, ケーキ生地の焼成工程中的の組織形成過程の研究に, 複素弾性率測定法を導入し, 貯蔵弾性率 (G'), 損失弾性率 (G''), $\tan \delta$, $G'' \cdot \tan \delta$ 等の連続測定を行った。その結果, 77~83°C の温度範囲内でまず, 小麦粉の熱変性によって組織形成が開始され, その後引き起こされる卵の熱変性によって完成されることが判った¹⁶⁾。これら二段階で起こるケーキ生地の熱変性は, モデルベーキング装置によって詳細に検討された¹⁷⁾。すなわち, 小麦粉の熱変性

は, 小麦粉中に存在する小麦澱粉粒子の糊化に起因することが, 偏光顕微鏡による澱粉粒観察や光透過度, 偏光強度の連続測定等によって確認された。さらに, ケーキ生地中の砂糖含有量によって, 澱粉の糊化や卵タンパク質の凝固が著しく影響されて, ケーキ品質を大きく左右させることも明らかになった¹⁸⁾。

ケーキの連続相は, 主要ケーキ原料である小麦粉, 砂糖, 卵, 油脂, 水等の混合物で構成されている。ケーキ製造においては, これら原料の配合比率, すなわち処方がケーキ品質決定の重要な要因の一つである。従来, 処方決定の理論的指標はなく, ケーキ職人の経験と古くから伝承されている経験則が唯一の拠り所であった^{19~24)}。筆者は前述の剛性率を指標として, 処方決定の科学的, 定量的研究を行った。その結果, 小麦粉と固体脂はケーキ組織を強くする物質 (Toughener), 砂糖, 水, 液体油はケーキ組織を弱くする物質 (Tenderizer), 卵は配合比率によって両方の作用をすることを明らかにした²⁵⁾。古くから, スポンジケーキの基本処方として知られている三同割配合 (小麦粉: 砂糖: 卵 = 1:1:1) は, 剛性率研究によって, 少しの配合比率変化によって大きく剛性率あるいはケーキ品質が変化する不安定な領域内に存在することも判った。この事実は, 従来のケーキ職人は多くの試行錯誤を重ね, 各ケーキ原料の役割を体験して, あえて, 極めて品質制御のむづかしいこの領域を選び, 長年の鍛錬で磨いた技術によってカバーすることで高品質のケーキ製造を達成したものと推察される。素人にとって, ケーキづくりがむづかしい理由の一つがここにあ

る²⁶⁾。

2. 不連続相に関する現象

モデルベーキング装置に装備されている顕微鏡及び写真撮影装置を利用して、焼成工程中におけるケーキ生地中の気泡の挙動を観察記録することができる²⁷⁾。調整直後のケーキ生地中には通常数 μm から数 $10\ \mu\text{m}$ の無数の気泡が不連続相として存在する。ケーキ生地が加熱されることによって、小さい気泡は隣接する大きい気泡に合一されて、小さい気泡は段々少なくなって、大きい少数の気泡に集約化されていく。小さい気泡の内圧は大きい気泡の内圧よりも高いために、小さい気泡から大きい気泡へのガスの拡散が気泡膜を通して起こる。この現象は、Young-Laplace の式で理解できる²⁸⁾。ケーキ生地温度の上昇に伴って、気泡の内圧は増加し、気泡間の合一も促進されるのであるが、連続相の組織形成も同時に進行し、ある温度で連続相の流動性が消失して、不連続相の気泡の膨脹が抑制される。さらに、気泡の内圧が増加すると、それ以上の気泡膨脹が不可能となって、ついに気泡の気泡膜が破壊して、気泡内ガスはケーキ生地外に放出されることになる。ケーキ生地の膨脹、停止、ガス放出の過程は、モデルベーキング装置で詳細に研究された²⁹⁾。

ケーキ生地が焼成中に膨脹する現象に関しては、Dunn と White³⁰⁾ 及び Mattil³¹⁾ によって検討が試みられたが、理論的解析はなされていなかった。筆者は、ダルトンの分圧の法則を、ケーキ生地の膨脹現象に応用することにより、ケーキ生地膨脹の理論式を検討した結果、次式を導き出すことができた³²⁾。

$$v_b^t = 2.53 \left(\frac{273+t}{760-p_w^t} \right) v_b^{20} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 v_b^t は $t^\circ\text{C}$ における気泡体積、 t は温度、 p_w^t は $t^\circ\text{C}$ における水蒸気圧、 v_b^{20} は 20°C における気泡体積である。式 (1) は、実際のオープン焼成中のケーキ生地膨脹を良く表わす理論式であることが確かめられている。よって、焼成工程中でのケーキ生地の膨脹は、ケーキ生地中の不連続相を構成している、気泡内に存在する空気及び水蒸気分子が加熱されることによって、それぞれの圧力を増すことですべて説明できるという結論に達した。

ケーキ生地は、連続相中に気泡が不連続相として存在しているので、泡の一種と見なすことができる。泡立ちに関する界面科学的性質は、起泡性と泡沫安定性という二つの因子で説明される^{33,34)}。ケーキ生地の泡立ちやすさを示す起泡性が、ケーキ体積に直接的に関係することは式 (1) が示している。泡の消えにくさを示す泡沫安

定性は、ケーキ品質にいかなる影響を与えるのであろうか。ケーキ生地にシリコンを添加することにより、種々のレベルの泡沫安定性を有するケーキ生地を調整し、焼成することにより、ケーキ生地の泡沫安定性とケーキ品質の関係について検討した^{35,36)}。泡沫安定性を示す重要な指標の一つである排水速度 (Rate of Drainage) という概念をケーキ系に導入した。ケーキ生地の排水速度式は次式で与えることができる。

$$-\ln(V_0 - V) = kt + \text{const.} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 V はケーキ生地からの排水量、 V_0 はケーキ生地中の初期液量、 t は時間、 k は排水速度定数である。すなわち、ケーキ生地にも排水現象が認められ、排水速度定数がケーキ生地の泡沫安定性を示す良い尺度になることが明らかになった。特に、ケーキ生地は昇温中に連続相の粘度が低下することによって泡沫安定性を低下させることが判った。60°C 以上においては、反対に連続相の粘度が上昇するために、泡沫安定性は向上して、70°C 以上ではもはや排水は生成しない。排水速度定数の大きいケーキ生地、すなわち、泡沫安定性に劣るケーキ生地は、焼成工程中にケーキ生地の内部に排水が出現し、この排水部分がケーキ焼成後に芯・生焼けと言われる、ケーキの品質上の重大な欠陥現象の直接の原因であることがつきとめられた。故に、現在では、式 (2) を適用することによって、ケーキを焼成せずに、ケーキ生地の段階でケーキに芯・生焼けが発生するかどうかの予想が可能になった。

焼成されたケーキは、不連続相が気孔によって構成されている多孔体である。よって、気孔量によって最終ケーキの物性、品質が大きく影響をうける。ケーキとして最も重要な性質である、ふっくらしたやわらかさや、食べた時の口どけ感等と気孔構造との関係は、ケーキ物性研究の中心的課題の一つである。しかし、ケーキ分野においては、気孔量とケーキ物性に関する研究は見当らなかった。筆者は、ケーキ構造が連続相と不連続相の二つの要素から成り立っているという認識のもとに、不連続相である気孔の含量とケーキ物性値である剛性率との関係を研究した結果、次の理論式を得た^{37,38)}。

$$G = G_0(1 - 1.67\phi + 0.67\phi^2) \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 ϕ は気孔率、 G ではケーキの剛性率、 G_0 は $\phi = 0$ での剛性率である。式 (3) の理論式が実際のケーキ系に適用できることは確認されている。式 (3) を用いることにより、 G 、 G_0 、 ϕ の三つの値の中で、二つの値が既知であれば、上式から第3の値を求めることができる。式 (3) はケーキの物性が気孔率によって大きく影響されることを示している。従来のケーキ研究においては、ケーキの品質を研究する場合に、ケーキの原料、処

方、調整方法等の条件については注意深く配慮されているが、ケーキの気孔率を無視して検討される場合がほとんどであった。故に今後は、詳細にケーキ品質を研究する場合、気孔率を考慮に入れることが、必須条件であると考えられる。

3. 連続相と不連続相の協同現象

ケーキ生地焼成中における、連続相及び不連続相で起こる個々の物理化学的現象について述べてきた。すなわち、連続相では小麦粉中の澱粉の糊化と卵中のタンパク質の熱凝固によって組織形成が行われる。一方、不連続相は気泡で構成されており、ケーキ生地膨脹の原因は、ケーキ生地中の気泡内に存在する空気分子と水蒸気分子の熱運動による圧力増大である。気泡は昇温と共に合一を繰り返すので、ケーキ生地中の気泡数は減少し、その平均粒径は増大していく。また、泡沫安定性が悪いケーキ生地では、連続相と不連続相の分離現象である排液が発生する。さらに、ケーキ生地中の気泡量が、最終の焼成されたケーキ物性に大きく影響する。では、いかなる時点で、ケーキ生地の膨脹が停止して、最終のケーキ体積、ケーキ構造が形成されるのであろうか。

驚くべきことに、標準ケーキ処方においては、88°Cに到達した時点で、ケーキ生地の膨脹が停止して、一気に最終ケーキ構造が形成されることが明らかになった。すなわち、ケーキ生地の膨脹停止温度 (t_3) において、連続相及び不連続相を含め、以下の11の現象が同時に起こる^{39,40)}。

《連続相で起こる現象》

- 損失弾性率 (G'') の極大
- 曳糸性 ($G'' \cdot \tan \delta$) の極大
- 光透過度の極大 (t_2)
- 澱粉の複屈折性消失
- 澱粉の糊化終了
- タンパク質の熱凝固の開始
- 粘性構造支配から弾性構造支配へ

《不連続相で起こる現象》

- 気泡の膨脹停止
- 気泡膜の破裂
- ケーキ生地の膨脹停止
- 気泡内気体のケーキ生地系外への放出

このことは、 t_3 がケーキ組織を完成させるために、最も重要な役割を演じる時点であることを物語っている。ケーキ製造の立場においては、品質管理上、いつも t_3 を一定温度に管理することが必要である。また、ケーキの品質改良のためには、 t_3 の温度を目的に沿って上下させることで達成することができる。このように、 t_3 は

ケーキ品質を理論的に検討するための、極めて重要な指標になることをつけ加えておく。

4. まとめ

ケーキの焼成工程中における連続相及び不連続相で起こる種々の物理化学的変化は、図-2にまとめることができる⁴¹⁾。焼成工程は、まず初期、中期、後期の三段階に分けて整理すると理解しやすい。

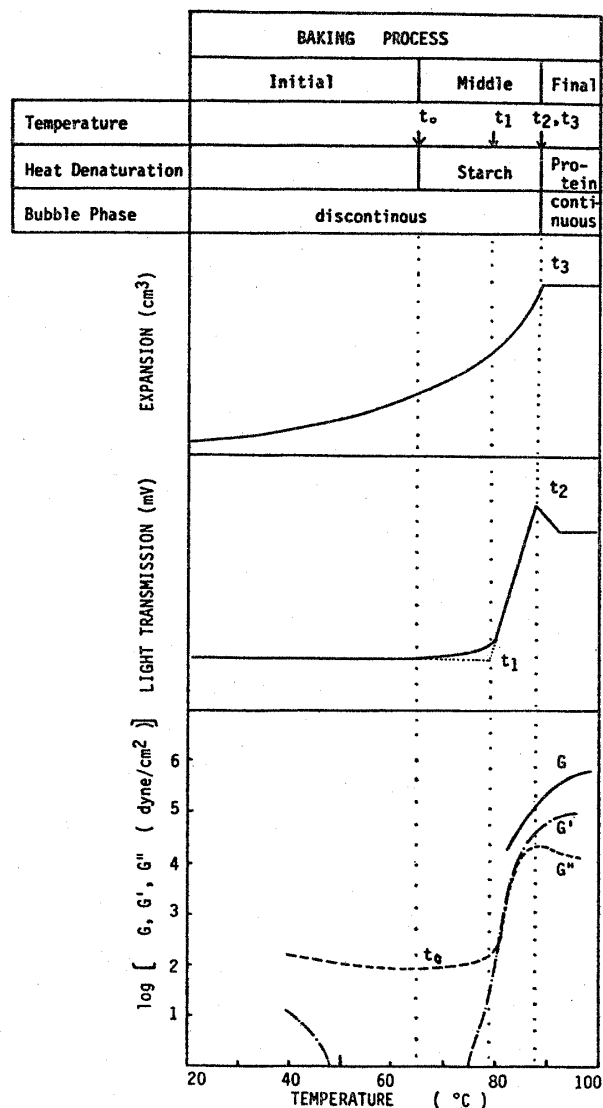


図 2. ケーキ焼成工程中の種々の変化

焼成初期においては、温度上昇と共にケーキの生地粘度が少し減少する。また、ケーキ生地中の気泡体積はゆるやかに膨脹しはじめる。泡沫安定性が劣るケーキ生地では、この時点で排液が出現する。連続相の熱変性はまだ観察されない。

焼成中期は、貯蔵弾性率 (G') と光透過度のわずかな上昇によって開始される。この原因は、澱粉の膨潤に起因するものと考えられる。温度上昇と共に、気泡内の

ケーキ焼成のメカニズム

圧力が増大して、気泡体積も増加する。特に、79°Cにおいて、光透過度、貯蔵弾性率と損失弾性率が急激に増大する。これは小麦粉中の澱粉粒が糊化を開始するからである。一方、不連続相の気泡も急激にその体積を増大させる。このような連続相と不連続相の急激な変化は、88°Cの t_3 まで続く。

焼成後期では、連続相に存在する卵タンパク質の熱凝固が開始されることによって、ケーキ生地は粘性構造から弾性構造支配に変化して、流動性が消失する。それに伴って、不連続相の気泡膨脹は抑制され、ついに気泡膜が破壊されて、気泡内に存在した気体はケーキ生地の系外に放出される。 t_3 の温度以上においては、タンパク質の熱凝固が進行して、連続相の弾性構造が一層強化されて、多孔体としてのスポンジ構造が完成されて焼成工程が終了する。

本研究のレオロジー的研究⁴²⁾、界面科学的研究^{43,44)}、ケーキ品質の制御方法^{43,45)}、ケーキ研究の流れにおける位置づけ⁴⁶⁾、及び詳細な解説⁴⁷⁾については参考文献と原報を参考されたい。

文 献

- 加藤唐九郎：芸術新潮，35 (3)，4 (1984)
- Mizukoshi, M.: "Food Emulsions 2nd ed." K. Larsson and S. Friberg eds. p.479 Marcel Dekker N.Y. (1990)
- 水越正彦：Pain 38 (2)，44 (1991)
- 水越正彦：Pain 38 (11)，47 (1991)
- Anker, C. A. and Gilles, K. A.: see Food Tech. 19, 640 (1965)
- Miller, B. S. and Trimbo, H. B.: Food Tech. 19, 640 (1965)
- Gaines, C. S. and Donelson, J. R.: Cereal Chem. 59, 237 (1982)
- Voisey, P. W., Paton, D. and Larmond, E.: Cereal Chem., 56, 346 (1979)
- Paton, D., Larocgue, G. M. and Holme, J.: Cereal Chem., 59, 237 (1982)
- Mizukoshi, M.: Cereal Chem., 56 (4) 305 (1979)
- Shepherd, J. S. and Yoell, R. W.: "Food Emulsions" S. Friberg ed. p.215 Marcel Dekker, N. Y. (1976)
- Ngo, W., Hosney, R. C. and Moore, W. R.: Cereal Chem., 50, 1338 (1985)
- Ngo, W. H. and Taranto, M. W.: Cereal Food World, 31, 317 (1986)
- Yasukawa, T., Mizukoshi, M. and Aigami, K.: "Fundamentals of Dough Rheology" H. Faridi and J. H. Faubion eds. p.63 Am. Ass. Cereal Chem. (1986)
- Mizukoshi, M.: Cereal Chem. 62 (4), 242 (1985)
- Yasukawa, T., Mizukoshi, M. and Aigami, K.: "Fundamentals of Dough Rheology" H. Faridi and J. H. Faubion eds. p.63 Am. Ass. Cereal Chem. (1986)
- Mizukoshi, M.: Cereal Chem., 56 (4), 305 (1979)
- Mizukoshi, M.: ibid., 57 (5), 352 (1980)
- Matz, S. A.: "Bakery Technology and Engineering" p.271, Avi, C. T. (1960)
- Sultan, W. J.: "Practical Baking" p.321, Avi, (1965)
- Borders, T. H.: Bakers Dig. 42 (Aug), 53 (1968)
- Lawson, H. W.: Bakers Dig., 44 (Dec), 36 (1970)
- Pylar, E. J.: "Baking Science and Technology" p.966, Siebel Pub., Chicago (1973)
- Daniel, A. R.: "Up to Date Confectionery" p.202 Appl. Sci. Pub., London (1978)
- Mizukoshi, M.: Cereal Chem., 62 (4), 247 (1985)
- 水越正彦：New Food Ind., 30 (7), 58 (1988)
- 水越正彦：Pain, 38 (4), 46 (1991)
- 水越正彦：ibid, 38 (5), 46 (1991)
- Mizukoshi, M.: Cereal Chem., 57 (5), 352 (1980)
- Dunn, J. A. and White, J. R.: ibid, 16, 93 (1939)
- Mattil, K. F.: "Bailey's Industrial Oil and Fat Products 3rd ed." D. Swern ed., p.356 John Wiley & Sons, N. Y. (1964)
- Mizukoshi, M.: Cereal Chem., 57 (5), 352 (1980)
- 佐々木恒孝："実験化学講座 7. 界面化学" p.201 日本化学会編，丸善 (1956)
- 水越正彦：Pain, 38 (7), 45 (1991)
- Mizukoshi, M.: Cereal Chem., 60 (5), 396 (1983)
- Mizukoshi, M.: ibid, 60 (5), 399 (1983)
- Mizukoshi, M.: ibid, 62 (4), 242 (1985)
- 水越正彦：Pain, 38 (10), 47 (1991)
- 水越正彦：New Food Ind., 30 (6), 71 (1988)
- Mizukoshi, M.: "Food Emulsions 2nd ed." K. Larsson and S. Friberg eds. p.449 Marcel Dekker, N. Y. (1990)
- Mizukoshi, M.: "Fundamentals of Dough Rheology", H. Faridi and J. M. Faubion eds. p.84 Am. Ass. Cereal Chem. (1986)

- 42) Mizukoshi, M.: *Rheological Studies of Cake Baking*. In "Fundamentals of Dough Rheology", H. Faridi and J.M. Faubion eds. p.73 Am. Ass. Cereal Chem., (1986)
- 43) Mizukoshi, M.: *Baking Mechanism of Cake Production*. In "Food Emulsions 2nd ed." K. Larsson and S. Friberg eds. p.479 Marcel Dekker N.Y. (1990)
- 44) 水越正彦: ケーキ製造に関する界面科学的研究, パン科学会誌, **37** (2), 3 (1991)
- 45) 水越正彦: ケーキ焼成のメカニズムとケーキの品質, *New Food Ind.*, **30** (6), 63 (1988)
- 46) 松井宣也: ケーキ研究の現況, 調理科学, **18** (4) 203 (1985)
- 47) 水越正彦: ケーキの科学, *Pain*, **38** (2) 4 (1991)