◇◇◇ 解説 (2006年度日本食品工学会技術賞) ◇◇◇

食品の品質革新と地球環境保護を目指した 食品工学的アプローチ

辻 本 進

味の素株式会社 生産技術開発センター

Food Engineering Approach for Innovating Food Quality and Preventing Global Warming

Susumu TSUJIMOTO

*Technology & Engineering Center, AJINOMOTO CO., INC.
1-1 Suzuki-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki, 210-8681, JAPAN*

Food engineering plays a significant role in food production to achieve a high quality. Increasingly discriminating consumer taste has resulted in pressures to improve the flavor quality of food products at ever higher stages. These trends have created demand for food products that offer superior characteristics at the highest stages of food quality. Food production at such levels will require approaches based on new food engineering. This paper will seek to address the role of food engineering in improving quality in food production processes. The examples used to illustrate these issues will include the following: 1) a quantitative evaluation of the kneaded state of bread dough; 2) quantitative identification of factors influencing the intensity of retort sterilization; and 3) quantitative determination of flavor component dissipation during spray-drying. The importance of preventing global warming is becoming more important. The research of LCA which evaluates the environment burden from producing of food stuff, production process, consuming to dumping, become important. The Food Engineering must contribute to improve the efficiency of LCA.

Keywords: quality, bread dough, kneading, retort, sterilization, spray drying, flavor, LCA, LC-CO₂

1. 緒 言

これまでの商品製造での品質制御は、経験と勘に頼っていた傾向にあった。その理由は、東大名誉教授の矢野俊正博士が、食品工学の特殊性として整理した。そのポイントは、Table 1 にまとめられると考えられる。

1の事例としては、小麦は、種類、産地、収穫からの時間で加工特性が異なる。また、2の事例としては品質評価が官能検査に頼られ、定量的な制御を防いでいる。3の点としては、1つの操作が同時に他の要素への影響があることである。例えば、殺菌操作での加熱がタンパクの変化などによる食感の変化に加えて色、香りの変化が起こる。

Table 1 The unique position of food engineering.

Specificity of Food Engineering

1. Unpredictability of physical properties of raw materials
2. Insufficiency of subjectivity in quality evaluations
3. Simultaneous occurrence of numerous changes.

食品工学は、上記の3点を踏まえ、品質の高度化を目指す必要がある。その具体的な事例を3例示す。

2. パンのドウの混練終点の制御 [2]

パンのドウの混練条件はパンの食感や口どけなどの出来上がり品質を決定する重要な工程である。原料の小麦の物性は、品種や収穫地域、収穫後の時間などで変化することが知られている。この複雑さのためこれまで混練時間の決定は熟練の職人の判断に委ねられて

きた。その定量化を試みた。実験は、Fig. 1に示すような品川工業所製、容量5Lのニーダー（5DML-r）を用いた。単純に電流値を測定するとFig. 2の結果を得た。このデータでは混練の終点制御に用いる事はできない。

測定で得られた電流値を100回／秒サンプルし、Fig. 3に示すように値の大きい順に並び替え、外乱による異常値が含まれている可能性がある最大から5つ、最小から5つのデータを除いた。次に、最大から5つの値の平均、最小から5つの値の平均値をとりそれぞれ最大値、最小値とした。Fig. 4は混練工程の経緯に伴うこれら2つのデータの変化を示す。この2つの値は、Fig. 5に示すように混練過程の現象の変化を明確に相関する

Fig. 1 Experimental bread dough mixer.

Fig. 2 Power load trend for mixing bread dough.

Fig. 3 Sorting of 100 electric power data points.

ことがわかった。第1のステージは「ピックアップ」とよばれ、「そばろ」状態である。最大値、最小値とも増加する。第2段階では、1つの固まりになり始める「クリーンアップ」となり、粘度上昇のため最大値は増加するがドウとフックが外れることもあり、最小値は低下がみられる。次の段階では粘弾性が増加し、最大値、最小値とも増加に転ずる「粘弾性増加」のステージになる。次に粘度低下のため最大値が低下するが、ドウの粘着性が増すため最小値は増加する「デベロップメント」のステージとなる。この状態が始まったとき混練終了のタイミングである「Dポイント」となる。こ

Fig. 4 Changes in the maximum and minimum values of a power load, Maximum and minimum values of vertical mixer power load for mixing bread dough Container temperature: 20°C, revolution rate: 75rpm, rotation coefficient: 4.58333 (H20-75) (P: Pickup, C: Cleanup, TP: Mixer torque peak measured, D: Development, L: Letdown).

Fig.5 Relationship between structural changes in dough and measurement data.

の状態では、グルテンのネットワークが破壊され、最大値、最小値とも低下する「レッドダウン」となる。この状態に至るとおいしいパンの製造はできない。

Fig. 6は回転数を変更した時のDポイントまでの時間をジャケット温度で相関したものである。ドウの温度はジャケット温度と同等と考えられ、ドウ温度が上がると混練時間は短くなる。また、回転数を増加すると混練時間は短くなるがわかる。

この現象を統一的に解析するために、Fig. 7に示すように、Dポイントまでの混練時間を絶対温度の逆数で相関すると各回転数ごとに直線関係が得られる。このことから混練工程はArrhenius式で相関できる1次反応のモデルで表現できることがわかる。

混練工程の混練翼の働きは、Fig. 8に示すように伸ばして折り畳むというモデルを想定し、混練状態はその回数で決まると考えた。Fig. 9は回数と混練の絶対温度を相関したものであるが、回転数に関わらず1本の線で表現できることがわかった。

Fig. 6 Relationship between mixing temperatures and mixing time until the D point.

Fig. 7 Relationship between mixing temperatures and mixing time until the D point corresponds to the Arrhenius equation.

3. 雰囲気条件のレトルト殺菌指数への影響 [3]

レトルト殺菌は広く利用されている食品殺菌技術である。レトルト釜に並べられたパウチ入り液体食品を高温の蒸気または熱水で殺菌して、長期保存食品を製造する技術である。パウチの厚み、雰囲気温度、殺菌開始時の品温の微妙な差が殺菌値である F_0 値に及ぼす定量的な影響を調べた。柔らかいパウチではそれ自体誤差が発生するので、ステンレス製の金属パウチを製作して使用した。少量の高分子増粘剤を添加することで実際の食品溶液の粘度に調整し、流動を抑えた。計算は、147 g (厚み 14 mm)、初期液体温度 85℃、レトルト釜の最低温度点を基準とした。比較する条件としては、充填重量と厚みを 138 g (厚み 12 mm)、初期液温 75℃、レトルト釜の最低点温度と最高点温度の差は 1℃とした。殺菌の基本条件は、120℃で 10 分間とした。伝熱は 1次元の伝導伝熱として以下の(1)式で解析した。

$$\partial T / \partial t = a \cdot \partial^2 T / \partial x^2 \quad (1)$$

この式と実験結果との整合性は、予備的な実験で良好と評価された。Fig. 10は厚みの影響を調べたものである。147gでの F_0 値は約8、一方、138gでは約5であった。2 mmの厚み差が3という大きな F_0 値の差となることがわかる。

実際の工業的なレトルト操作での1回のレトルト釜での最初と最後のパウチ内液温を観察すると、約10℃異なり、約75℃と約85℃あった。この温度差の影響はFig. 11に示すように約1の F_0 値の差がみられた。

Assumption that mixing time depends on frequency rather than the amount of energy expended

Fig. 8 Mixing hook action.

Fig. 9 Relationship between mixing temperatures and mixing time until the D point by number of mixing revolutions.

Fig. 10 Effects of filling volume differences on F_0 value.
 ●: Temperature of product 14 mm in thickness,
 ▲: Temperature of product 12 mm in thickness, ■: F_0 value of product 14 mm in thickness, ×: F_0 value of product 12 mm in thickness.

Fig. 11 Effects of initial product temperature differences on F_0 value. ●: Temperature of product initially at 85°C,
 ▲: Temperature of product initially at 75°C, ■: F_0 value of product temperature initially at 85°C, ×: F_0 value of product temperature initially at 75°C.

実際のレトルト釜では位置の違いによる温度の最低点と最高点が存在する。とくに蒸気を加熱源に使用する場合は大きく、観察では約1°Cであった。その温度差が F_0 値に与える大きさはFig. 12に示されるように約1であった。検討した因子の中で充填量の F_0 値に対する影響が最も大きいことがわかった。実際には、幾つかの因子が同時に影響するので、大きな F_0 の差が生じ、殺菌不良による食品衛生上の課題と過殺菌による風味、食感の低下が同時に発生する。解析結果を受けて総合的に考え、対策しなければならない。

4. 噴霧乾燥での香気成分の保持 [4]

噴霧乾燥は、食品の乾燥に多用される乾燥法である。同様にポピュラーな凍結乾燥と比較すると、一般的にはコストの面で優位であるが、品質は低いと評価され

Fig. 12 Effects of differences in ambient temperature on F_0 value.
 ●: Temperature of product at the coldest point,
 ▲: Temperature of product at the hottest point, ■: F_0 value at the coldest point, ×: F_0 value at the hottest point.

ている。本研究では、香気成分保存の点から品質向上を検討した。1980年代オランダのThijssen, Kerkhof, アメリカのKingら、日本の桐栄、岡崎、古田、辻本は噴霧乾燥時の香気成分散逸を選択拡散理論で解析しようとした。その理論は乾燥時の液滴中の水分と香気成分の移動を拡散式で表現しようとしたもので、水の移動は(2)式で表現され、香気成分の移動は、(3)式で表現される。

$$\frac{\partial cw}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial d} \left\{ r^2 \left(Dw \frac{\partial cw}{\partial t} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial ca}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 \left(Da \frac{\partial ca}{\partial r} + Dwa \frac{\partial cw}{\partial r} \right) \right\} \quad (3)$$

これら2つの式を液滴表面の水と香気成分の気液平衡関係を考慮して解く。水と香気成分の拡散係数はキャピラリー法と脱着法を組合わせて測定した。香気成分の気液平衡関係は、成分濃度を変更した液を恒温槽で容器に密閉し、その気相の香気成分濃度をガスクロマトグラフィーで測定することで得られた。

第1段階では単一液滴の乾燥実験で選択拡散理論の確かさを調べた。Fig. 13に単一液滴の乾燥装置を示す。液滴重量変化を測定するマイクロバランスに直結した極細ガラス棒に約2 mm径の単一液滴を吊るして、温度、湿度などを調整して乾燥し、各段階での水分、香気成分の変化を測定した。乾燥の進行はマイクロバランスで測定した。また、香気成分量はガスクロマトグラフィーで測定した。モデルの固形成分としてはマルトデキストリンを用い、モデルの香気成分としては200ppmのエタノールとアセトンを用いた。

種々の初期濃度 (m_0)、空気温度 323 K、風速 1.15 m/sec、絶対湿度 6 g/kg で乾燥した結果をFig. 14に示す。結果は実験結果と理論は初期固形分濃度が20%以下を除き、よく一致した。したがって、選択拡散理論は、単一液滴の乾燥に伴う香気成分の散逸を良く説明することがわかった。

次に、実際の噴霧乾燥で選択拡散理論の確認を行った。用いた噴霧乾燥機は、直径 1.6 m、高さ 14.5 m のもので、Fig. 15 に示す。サンプルはノズルから 0.2 m

Fig. 13 Laboratory equipment for single droplet drying.

Fig. 14 Effects of single droplet drying on flavor preservation.

Fig. 15 Spray dryer used in experiment.

および乾燥された粉末で行った。

Fig. 16 はその結果を示す。初期固形分の増加に伴い、香気成分の保持率は高くなるが、単一液滴の乾燥結果と比較して遥かに低く、実用的な固形分濃度である 40% 以下では 1% 以下の香気成分残量である。したがって、実際の噴霧乾燥での香気成分の散逸は選択拡散理論だけでは説明できない。カリフォルニア大の King ら [5] は、ノズル近傍の香気成分の散逸をエチレンアセテートを用いて測定した。Fig. 17 は、ノズルから 20 cm で 40% 以下の香気成分保持率しかないことがわかった。香気成分は明らかに拡散ではなく、ノズル出口での液滴形成時に激しいせん断力が働き対流が生じるた

Fig. 16 Flavor preservation rate for dry powder in spray-drying experiment.

Fig. 17 Flavor preservation rate for dry powder in spray-drying experiment.

め、気液平衡によって液滴表面から香気成分が失われていると考えられた。その内部対流を防ぐため、ゼラチンを1%添加した。

結果は、Fig. 18に示すように飛躍的に香気成分の保持が向上し、値は選択拡散理論による計算値と一致し、凍結乾燥での香気成分保持率と同等になった。

5. 手作り食品のLC-CO₂ 評価

地球温暖化対策の中で食の持続的な維持をめざす中で、その環境負荷を正しく評価することがまず必要である。評価の第1段階として、家庭でのモデル手作りメニューを設定して解析した。実際の食生活では、手作りだけでなく外食を組合わせたり、一部は手作りに加工食品を加えた食生活をしているが、のちの解析で外食、加工食品の影響を明確にするためモデルメニューでは、外食、加工食品を含まないメニューを設定した。メニューは、厚生労働省のバランスガイドを用い、朝食、昼食は1種類ずつであるが、夕食は和食、中華、洋食の3種を検討した。カロリーは、30~49歳の女性で身体レベル普通(Ⅱ)を対象として組んだ。Table 2は、朝食のメニューとその重量を4人分で示す。

1日の全てのモデルメニューとそれぞれの調理に必要なエネルギーによるLC-CO₂ データをTable 3に示す。

各素材のLC-CO₂ は味の素版LC-CO₂ 表 [6] を用い環境負荷を評価した。調理で発生するLC-CO₂ を加え

Table 2 Model breakfast menu for analysis.

Menu		
	Food item	Serving for 4 (g)
Toast	Sliced bread	240
	Butter or margarine	24
	Strawberry jam	40
Sunny-side up egg	Egg (nett)	200
	Vegetable oil	4
	Salt	1
	Pepper	Small amount
Salad	Lettuce	160
	Cucumber	120
	Tomato	240
	Mayonnaise	48
	Plain yogurt	400
Coffee	Coffee (Medium ground)	40
	Sugar (Granulated sugar)	12
	Milk	20

るとTable 4となる。各年度のデータでメニューのLC-CO₂ は若干の増加をすることがわかる。

この解析で、明らかになったことは、1) 原料としてLC-CO₂ が高いのはタンパク源である畜産物、ついで海産物である。2) 調理法として、LC-CO₂ は茹でる、煮る、蒸すが大きく、炒める、揚げるという調理法はLC-CO₂ が低い。3) メニューとして、朝食は、約1,000g-CO₂、昼食は、約1,500g-CO₂、夕食は、2,000~3,000g-CO₂であった。4) 使用する味の素版LC-CO₂ 表の年度によってLC-CO₂ は若干増加することがわかった。

6. 結 言

理論的なアプローチの困難のため、品質向上の取り組みはこれまで経験的な取り組みになっていた。3例に示したように、加工によって食品に生じる現象を確認しながら、食品工学の知見と解析を駆使することにより品質革新に向けた定量的な制御が可能となると考えられる。地球温暖化対策に対する食品工学の寄与として、食に関わる環境負荷を低減する使命がある。第1段階として、モデルの手作り食品のメニューの環境負荷を測定した。今後、外食や加工食品を取り込んだ実際の食行動パターンに沿った環境負荷や廃棄による環境負荷を検討する必要がある。

Fig. 18 Flavor preservation rate in dry powder in spray-drying experiment with gelatin.

Table 3 Medel menu for 1 day.

	Menu	Preparation Method	Gas/Electricity	Load of CO ₂ (g CO ₂)
Breakfast	Toast	Toasting	Electricity	31
	Sunny-side up egg	Frying	Gas	51
	Salad	—	—	—
	Yogurt	—	—	—
	Coffee	Brewing	Electricity	35
Lunch	Ramen	Boiling, decocting	Gas	649
	Fruits	—	—	—
	Tea	Brewing	Gas	47
Snack	Blancmange	Heating	Gas	77
Dinner 1 Japanese-style	Rice	Boiling	Electricity	80
	Grilled fish	Grilling	Gas	103
	Steamed egg hotchpotch	Steaming	Gas	297
	Boiled spinach	Boilling	Gas	59
	Miso soup	Simmering	Gas	133
	Dessert	—	—	—
Dinner 2 Western-style	Rice	Boiling	Electricity	80
	Hamburger	Frying	Gas	195
	Potato salad	Boiling	Gas	137
	Corn potage soup	Simmering	Gas	91
	Dessert	—	—	—
Dinner 3 Chinese-style	Rice	Boiling	Electricity	80
	Szechwan vegetable and meat soup	Simmering	Gas	90
	Fried chicken	Deep frying	Gas	102
	Stir fry vegetables with meat or seafood	Stir frying	Gas	103
	Dessert	—	—	—

Table 4 LC-CO₂ of model menu at each year 1990, 1995, 2000.

	1990	1995	2000
Breakfast	1,186	1,160	1,359
Lunch	1,558	1,706	1,932
Dinner 1	1,766	2,060	2,147
Dinner 2	2,768	2,720	2,896
Dinner 3	2,353	2,602	2,707
3-day average	5,040	5,327	5,874
	1	1.06	1.17

References

- [1] T. Yano; Basic Lectures on Food Engineering, **1**, Korin, 1989
- [2] N. Ban; Japan Society for Food Engineering/Forum 2002 Spring “Sensing technique of production for delicious and safety”, “Optimum mixing condition sensing method using with mixer electric power”, 2002
- [3] K. Nagashima, M. Tanabe; Japan Society for Food Engineering/Annual meeting 2000, “Analysis of retort sterilization”, 2000
- [4] S. Tsujimoto, R. Toei, M. Okazaki, T. Furuta.; Proceedings of International Drying Symposium vol.1, 397 (1984)
- [5] T. G. Kieckbusch, C. J. King: AIChE J., **26**, 718 (1980).

引用 URL

- [i] LC-CO₂ database for food materials, AJINOMOTO Environment Report. <http://www.ajinomoto.co.jp/company/kankyo/> (2006.09.30)

要 旨

食品製造における品質革新に食品工学が果たす役割りは大きい。食品製造では、矢野俊正東大名誉教授が指摘されたように、1) 原料の組織・構造が一定しない、

2) 品質評価の客観性が低く官能評価だけに頼っている傾向がある、3) 食品加工プロセスでは同時に複数の変化を食品にあたえるなど食品工学的な課題も多い。本稿では、1) パン生地の混練状態の定量的把握、2) レトルト殺菌の殺菌強度に与える因子の定量化、3) 噴霧乾燥におけるフレーバー散逸の定量化を例に食品プロセスにおける食品工学の品質向上への役割りを示した。また、地球温暖化対策の重要性が増す中、食品の環境負荷低減を図る第1歩として、モデルメニューを設定して、原材料の生産、加工、消費までの環境負荷をLCAで評価した。