

[ 別紙 2 ]

## 論文審査の結果の要旨

論文題目 食パン生地特性の可視化技術と品質評価に基づく製造工程最適化手法の開発

申請者氏名 前田 竜郎

製パン工程はミキシング、発酵および焼成工程から成り立っており、この製法は古代エジプト時代から職人の技として現在まで継承されてきた。しかし、同じ製パン原材料でも職人が造ったパンのおいしさは、一般の人が造ったものとは異なる。発酵と焼成は時間と温度により制御可能であるが、いわゆる職人の技が発揮されるのはミキシングの良し悪しにある。この技をミキシング工程の最適化に反映させるためには、ミキシングにおける生地の動態を解明すると共に、最終製品の品質に関する機器分析と官能評価を行い、その関連性を定量的に明らかにし、製パン工程の最適化を行うことが重要であると考えられた。

ミキシングの主な目的は、パン酵母などの原材料の均一分布化を図るとともに、グルテンを十分に形成し、気泡核を抱き込むことにある。すなわち製パンとは、グルテンネットワークに抱き込んだ気泡核に、パン酵母から産生された炭酸ガスが集まって膨張し、これを焼成により固定化することと言える。しかし、生地中で2~8ミクロンの小さなパン酵母を正確に識別すること、薄い膜状または細かい網目状に発達するグルテンネットワークを計測すること、さらに、生地中に分布している気泡核分布を計測することは極めて困難であり、生地全体の3次元構造を解明する技術は未発達の現状にある。

本研究の目的は職人の伝統的技を解明するために、ミキシングにより形成される生地構成成分の可視化技術を開発し、さらに、最終製品の機器分析と官能評価に基づき製パン工程を最適化する手法を開発することである。以下に本研究により開発したパン酵母、気泡およびグルテン、すなわち、3つの生地構成成分の可視化技術について述べる。

パン酵母の可視化技術を開発するには、酵母表面を発色させる必要があると考え、細胞表層工学の手法を導入してパン生地に適した蛍光発色酵母を創製した。すなわち、遺伝子操作により、酵母の細胞表層に変異体緑色蛍光タンパク質 (EGFP) を発現させることにより、酵母の表層を強く蛍光発光させることに成功し、パン生地中でも酵母が明瞭に識別できることを確認した。さらにマイクロスライサ画像処理システム (MSIPS) を利用して、EGFP 酵母のサイズ、形態および分布などを3次元的に計測し、さらにパン酵母間の最短重心間距離の平均値と標準偏差から、パン酵母の分布

状態を定量的に把握する手法を開発した。

パン生地中の気泡の計測法として、MSIPSによりパン生地中の気泡計測法を開発した。その結果、パン生地内の気泡サイズ分布から大部分は10~15 $\mu$ mの範囲に分布していることが確認され、生地の冷凍操作に依存する気泡サイズ分布の変動状態などを計測することが可能となった。また、パン生地中のグルテンネットワークと澱粉粒を同時に可視化するために、蛍光染色剤と蛍光顕微鏡を活用してグルテンと澱粉粒の構造・分布を鮮明に識別する計測法を開発した。また、グルテン網の総距離と幅を指標とする解析法を考案し、ミキシング段階におけるグルテンの発達状態を評価することが可能となった。

最終的には、これらの新計測・評価手法と食感性工学の方法論を導入して最終製品の機器分析と官能評価に基づく製パン条件の最適化手法を開発した。まず、官能評価により製造条件が香り・味に及ぼす影響を検討した結果、食パンの香り・味を支配している要因はミキシングに要するエネルギーであることを明らかにし、これまで、経験的に言われてきたミキシング操作の重要性が実証された。また、生地内部の外観情報もおいしさの評価に影響を及ぼしていることが分かった。また、機器分析値と官能評価点との関連性について分析した結果、個々の機器分析値は、官能評価の味・香り・食感それぞれと相関関係があることが分かった。

おいしさに対するミキシング段階および発酵時間の影響をマルチスプライン補間による応答曲面として図示した結果、最もおいしいと評価された点はオーバーミキシング段階で発酵時間60分から120分の範囲にあり、その極大値は経験的に最適条件と言われてきたファイナル段階・発酵時間120分からオーバーミキシング側にシフトしていることが判明した。この理由の一つとしては、現在の小麦粉は従来のもものと比較して品質改良が進み、ミキシング耐性が強くなっている可能性が考えられた。この結果、ミキシングエネルギーを約2倍に増大させることにより、現在使用されている小麦粉に対応したミキシング操作・発酵時間の最適化が図れることを確認した。このように食感性工学の手法を導入したことにより最適製パン製造条件を探索することが可能となった。

以上の研究成果により、審査委員一同は本論文の学術的な独創性と実用的な有用性を高く評価し、博士学位論文として価値あるものと認めた。