

[ 別紙 2 ]

## 論文審査の結果の要旨

申請者氏名 柴田 真理朗

---

製パン産業は現代の大規模工場においてさえ、経験豊かな技術者、つまり職人による生産管理が行われている。そのような“ノウハウ”にあたる技能は、職人のみが体感・経験している事柄であり、客観的な指標に変換されていない。この匠の技を定量化するには、最終製品のおいしさに関与する品質評価法を確立し、さらに、これらの個別技術により得られたデータの関連性を定量的に明らかにすることにより、最適製パン操作条件の探索手法を開発することが必要である。しかしながら、既往の研究では焼成パンの内部構造あるいは、力学物性と官能評価を関連づけた研究、さらにはそれらを定量的に関連付け、最適化した総合的な研究は数少ない。

本研究では、1)客観的な画像処理法を用いたパンの気泡構造の定量化アルゴリズムを作成し、2)焼成パンの粘弾性および気泡構造の定量化手法を開発し、3)食感性工学において用いられる数学・統計手法のプロトコルを確立し、4)物理化学的特性および官能評価を定量的に関連付けた焼成パンのおいしさ予測モデルを開発した。

以下に、本論文の具体的手法と成果について概説する。

第1章では、まず製パンプロセスの各工程、焼成パンの内部構造とその画像処理、および焼成パンの力学的物性に関する既往の研究をレビューした。その結果、内部構造単独の研究は実施されているが、それらと力学物性を定量的に関連付けた研究例、およびパンの粘弾性を計測した研究は数少ないことがわかった。

第2章では、食感性工学の既往の研究で用いられている手法とその問題点について言及した。ヒトの味覚や嗜好を定量化し、製品設計に役立てることを目的としている食感性工学の既往の研究で扱われた試料は全て液状食品であり、構造や力学物性を持つ一般的な食品を対象とした研究はなく、一般的な食品に拡張した場合に想定される問題に対して、統計・数学的手法の適用法のプロトコルが存在しないという問題がある。また、既往の研究においてモデリング関数として用いられてきたニューラルネットワークは隠れノード数やオーバーフィットペナルティをはじめとするフィッティングパラメータに試行錯誤が必要であり、モデル構築が困難となる可能性を指摘した。そこで、与えられたデータに対して一意的に曲面を描く多次元スプライン関数応答曲面法が、食感性工学の最も重要な工程であるヒトの感覚と食品の設計パラメータの関係のモデル化のニューラルネットワークに代わる有用な代替手法となり得る可能性を示した。

第3章では、パンの気泡構造を定量化するために、迅速にデータを取得可能なイメージスキャナと画像処理を用いた簡便で客観的な計測手法を開発した。パン試料の画像から気泡を検出し易くするために、直交する4方向から同一試料を撮像し、最も輝度の低い画像の数値をとる min 合成を適用した結果、気泡が強調された画像を得た。次に、Otsu の二値化手法をブロックごとに適用し、画像全体から均一に気泡を検出した。その際の最適なブ

ロックサイズは 20×20 pixel であった。さらに、2 種類の市販試料について気泡部分をラベリングした後、平均気泡面積、平均周囲長、単位面積当たりの気泡数および気泡面積割合（画像全体に占める気泡面積の割合）を算出した。それらのパラメータにサンプルを要因とする t 検定を適用した結果、すべての項目に対して有意な差が検出されたことから、2 種類のパン試料において、気泡構造の特徴の差は的確に抽出されたと考えられた。

第 4 章では、すだち（気泡構造）からパンの食感を推定するために、粘弾性と気泡パラメータを計測し、さらにそれらの関係の定量化を行った。まず、パンのスライス断面内は不均一と予想されたので、部位間のサンプリングサイズの最適化を実施した。次に、クリープ試験により得られた時間-歪曲線に 4 要素フォークト粘弾性モデルを適用し、4 つの粘弾性係数（瞬間弾性、遅延弾性、遅延粘性および永久粘性）を得た。一方、イメージスキャナにより撮像したデータに、画像処理を利用した前章で構築した気泡検出法を適用し、平均気泡面積、平均気泡周囲長、単位面積当たりの気泡数、および気泡面積割合の 4 つの気泡パラメータを算出した。最終的に、瞬間弾性、遅延弾性および定常粘性と気泡面積割合（画像全体に占める気泡面積の割合）に有意な相関がみられた。実際の咀嚼方向の粘弾性とスライス断面の気泡パラメータに相関関係があることから、実際にすだちを目視して、食感を判断することが妥当であることが示された。

第 5 章では焼成パンのおいしさ予測モデルを開発するための方法を確立するために、折込油脂によって物性の操作が容易なデニッシュペストリーを試料として、その物理化学的特性を特定し、一連のテクスチャ測定法および解析法を提唱した。まず、荷重と歪が線形性の範囲を決定し、さらにクリープ試験により得られた粘弾性係数を食感のパラメータとした。加えて、機器および官能評価データに分散分析および主成分分析を適用することにより、8 個の物理化学的特性および 5 つの知覚因子（主成分分析により変換された官能評価スコア）をモデル変数として選択した。次に、知覚因子とおいしさを重回帰分析により関連づけ、さらに成分と物理化学的屬性の最適値を多次元スプラインおよびリグレット関数によって算出した。物理化学的特性が 8 変数の際の最適値はスプラインの過度の近似による外れ値とみなせたため、クラスター分析による解の検証を行った。その結果、最大高さ、密度、含水率、油分、瞬間弾性 および永久粘性 がデニッシュペストリーの内的属性の最適な組み合わせであることが判明した。最終的にこれらの結果から、おいしさモデル開発のための統計・数学手法の解析プロトコルを提唱した。

以上より、本研究ではまず、パン気泡構造の迅速、客観的な計測法が確立された。さらに得られた気泡パラメータと粘弾性との定量的な相互関連性を探索した結果、官能評価データとの関連付けが可能な気泡構造および粘弾性パラメータが得られることがわかった。物理化学的特性および官能特性をモデル化し、おいしさを最大化する物理化学的および官能特性を算出するための一連の統計・数学手法のフローを開発した。モデル関数として多次元スプライン関数を食品分野に適用したのは本研究がはじめてである。

本研究の成果を発展させることにより、食品産業における伝統的な匠の技を定量化されたノウハウに次世代に継承することが可能となるものと期待される。

以上審査委員一同は、こうした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、本論文が博士（農学）の学位論文として価値あるものと認めた。