

京都大学	博士（工学）	氏名	山田盛二
------	--------	----	------

論文題目	製パン工程における熱的操作に関する研究
------	---------------------

（論文内容の要旨）

本論文は、製パン工程の中でも製品の品質にもっとも強い影響を与える冷凍・保存・解凍・焼成の工程に注目して、各工程における熱的操作とパン生地・クラム(湿潤層)・クラスト(乾燥層)の性状との関係を調べ、製パン工程における熱的操作の最適化の指針を得るための研究の結果をまとめたものであり、7章からなっている。

第1章は緒論であり、製パン工程の流れについて概説し、冷凍・保存・解凍・焼成の各工程における熱的操作の重要性と克服されるべき技術的課題を示し、本研究の意義と目的を明らかにしている。

第2~4章では、冷凍生地製パン法における冷凍・保存・解凍工程に注目している。製パン工程における熱的操作の最適化を図るには、パン材料の熱物性値、とりわけ有効熱伝導度の知見が重要であるが、まず、第2章では、凍結温度や澱粉の糊化温度を含む $-80\sim+100^{\circ}\text{C}$ の温度域にあるパン生地・クラムについて、その有効熱伝導度の温度特性を実験的に調べている。凍結温度以下の温度域にあるパン生地では、その有効熱伝導度は、含有する水の影響を強く受けて、凍結していないパン生地の値の2倍程度に高いことを見出している。また、発酵過程で空隙率が増加するとパン生地の有効熱伝導度は減少するが、その挙動はMaxwell-Euckenの式でよく記述されることを確認している。

第3章では、冷凍生地製パン法において発生する冷凍障害を軽微に抑え、所要の品質を実現するための冷凍の条件を探っている。パン生地の冷凍・保存工程における凍結速度と最低到達温度(履歴における最低温度)に注目し、第2章で測定した有効熱伝導度の温度特性値を用いて直接差分法による数値計算を行って、パン生地を冷凍する際に生地内部に生じる凍結速度分布や温度履歴を調べている。また、凍結速度と最低到達温度を冷凍条件のパラメータとして製パン実験を行い、数値計算の結果と比較して、この計算がパン生地の冷凍・保存工程下でのパン生地の状態変化をよく推定することを確認している。すなわち、この計算では、冷凍・保存工程においてパン生地の最低到達温度が酵母の失活温度を下回ると、あるいは凍結速度が低すぎると、パン生地の発酵ガス量やガス保持性が低下して生地構造が脆弱になることが示されている。この示唆は、炭酸ガス発生量を適切な値に制御してガス保持性が高いパン生地を形成し気泡径が小さく均一に分布する高品質のクラムを実現するには、凍結速度と最低到達温度を適切に制御することが重要であることを述べている。

第4章では、冷凍生地製パン法における解凍条件について検討している。

京都大学	博士（工学）	氏名	山田盛二
<p>直接差分法による数値計算によって、冷凍パン生地の解凍工程における生地内部の温度分布の時間変化を調べ、温度に依存する生地の凍結率と最大氷結晶生成帯と呼ばれる((凍結温度)~(凍結温度-4℃))の温度域における滞留時間の2つのパラメーターに注目している。凍結率と滞留時間の設定が適切でないとパン生地にガス保持性の低下などの障害が起こり、製品の品質が低下することを見出し、また、解凍工程で生じる生地の障害レベルを推定するには、従来から用いられてきた最大氷結晶生成帯域での滞留時間が一つの重要な指標となることを確認している。さらに、生地のガス保持率を測定し製パン実験を行って、その結果を数値計算の結果と比較し、数値計算の妥当性を検証している。</p> <p>第5~6章では、食パンの焼成工程に注目している。第5章では、食パンの焼成工程における温度場と有効熱伝導度を測定している。ポリイミドフィルム上に2種の金属を真空蒸着して一定の間隔で測温接点列を構成した薄膜熱電対と、細線を集積した熱電対の2種類の熱電対を作製し、焼成工程における食パン生地の表面層部の温度分布と食パン型からパン生地に流れる熱流束の時間変化を実験的に調べて、焼成工程中の水分移動の寄与を考慮する有効熱伝導度を評価し、その有効熱伝導度が、相変化を伴わない系の有効熱伝導度に比べてはるかに高い値をとることを示している。</p> <p>第6章では、食パン焼成工程における熱・物質移動現象を明らかにするとともに、クラスト形成の機構を調べ、また、これまで測定が困難であったクラストの有効熱伝導度を求めている。すなわち、焼成工程において、食パン型からパン生地に流れる熱流束の挙動を測定し、外部からパン生地に供給される熱エネルギーが潜熱あるいは顕熱として消費される割合の時間変化を評価している。また、さまざまな条件での焼成工程における水分蒸発量とパン生地表面層部の見掛けの密度の変化を測定し、内部のクラムから表面層部でクラストが形成される過程で、クラスト内の気泡が破裂しパンが高密度化する現象を考察している。このパン生地表面層部の高密度化は、焼成工程の中期までは優勢であるが、その後にはその速度が鈍化することを示している。クラストが形成されるパン表面層部において100℃の移動境界領域をもつ焼成過程のモデルを提案し、パン生地の水分が蒸発してクラムが高密度化し、乾燥したクラスト層が形成され成長する機構を明らかにしている。また、パン生地への熱流束の測定結果から焼成時間に対するクラスト層の厚さの変化を推定して、乾燥し高密度化したクラスト層の有効熱伝導度を求め、より簡単な指針をもって焼成工程における熱的操作の最適化を図ることを可能にしている。</p> <p>第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、製パン工程の中でも製品の品質にもっとも強い影響を与える冷凍・保存・解凍・焼成の工程に注目して、各工程における熱的操作と工程下で経時変化するパン生地・クラム・クラストの性状との関係を熱物性工学的に調べ、製パン工程における熱的操作の最適化の指針を示唆する研究の成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

(1) 製パン工程における熱的操作の最適化を図るには、パン材料の熱物性、とりわけ有効熱伝導度の知見が重要である。本研究では、凍結温度や澱粉の糊化温度を含む温度域にあるパン生地・クラムについて、その有効熱伝導度の温度特性を実験的に調べ、凍結温度以下の温度域にあるパン生地では、その有効熱伝導度は、含有する水の影響を強く受けて、凍結していないパン生地の値の2倍程度に高いことを見出した。また、発酵過程で空隙率が増加するとパン生地の有効熱伝導度はMaxwell-Eucken式で表される減少挙動を示すことを確認した。

(2) 冷凍生地製パン法においては、冷凍障害を軽微に抑え所要の品質を実現するための冷凍・保存・解凍の条件を知ることが重要である。本研究では、冷凍・保存・解凍工程におけるパン生地内部の温度分布変化を計算する手法を提案し、この手法がパン生地の工程下での状態変化をよく推定することを示した。すなわち、冷凍・保存工程においてパン生地の最低到達温度が酵母の失活温度を下回ると、あるいは凍結速度が低すぎると、パン生地の発酵ガス量やガス保持性が低下し、生地構造が脆弱になることを示し、また、解凍工程における最大氷結晶生成帯域での滞留時間が長すぎるとパン生地の障害レベルが高まることを明らかにした。

(3) 食パンの焼成工程における熱・物質移動とクラスト形成の機構については、これまで不明の点が多かった。本研究では、焼成工程における食パンの表面近傍の温度場と食パン型からパン生地に流れる熱流束の挙動を実験的に調べ、その工程下におけるパン生地内部での水分移動の寄与を考慮する有効熱伝導度特性を明らかにした。また、外部からパン生地に供給される熱エネルギーが潜熱あるいは顕熱として消費される割合の時間変化を評価し、パン生地の水分が蒸発してクラムが高密度化し、乾燥したクラスト層が形成され成長する過程を明らかにした。さらに、クラスト層の有効熱伝導度を求め、より簡単な指針をもって焼成工程における熱的操作の最適化を図ることを可能にした。

本論文は、製パン工程における熱的操作が製品の品質に及ぼす影響を明らかにし、実際の装置の設計・操作の指針を示すものであり、学術上、実際に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成24年2月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。