

学位論文の要旨

論文題目

麺類の乾燥工程の効率化・省エネルギー化に関する研究

氏名 杉山 久

【本研究の背景及び目的】

近年、地球環境の破壊は著しく進んできており、地球規模で取り組むべき重要な課題となっている。地球への環境負荷を低減させるために、食品製造企業では二酸化炭素の削減や消費エネルギーの効率化を積極的に進めている。特に、エネルギーを効率的に使うための製造工程の見直しが重要な課題となっている。ところで、本研究で注目した即席麺は世界で年間約 950 億食が生産されており、日本では年間約 53 億食が生産されている。また、即席麺の製造工程中における二酸化炭素排出量の多い工程は蒸煮・乾燥工程であることが報告されている。そこで、本研究では食品の製造能力を低下させず、二酸化炭素の排出量、及び使用エネルギーの削減を達成することを目指し、乾燥麺類の製造工程の見直しと、その結果に基づいた乾燥工程における消費エネルギーの効率化を検討した。

麺類の乾燥に関する研究は乾麺に関する報告が多く、かつ、低温度で長時間の乾燥工程について研究した報告が多い。しかし、即席麺のような大規模商業生産ラインの場合には、これらの研究のような低温度で長時間の乾燥工程を取ることは難しく、乾燥の効率化を検討する際には、あまり有用な基礎データとはならない。さらに、大規模商業生産ラインで用いられている、高温域での乾燥や蒸し工程（プレクッキング）を加えた乾燥については、殆ど報告例がない。また、高温域での麺類の乾燥は、水分蒸発が急激に起こるため、麺内部で発泡する現象が発生しやすいことが問題となっている。麺類の乾燥工程でこの発泡現象が起こると、外観、食感そして保形性が著しく低下するため、麺の商品価値が失われる。一方、適切な温湿度条件で乾燥することにより、麺内部の発泡が抑制され、良好な品質の乾燥麺類に仕上がる。しかし、実際の即席麺の製造工程に対応した乾燥条件のもとで収集した乾燥データは殆ど公表されていない。

本研究では、麺類の乾燥工程において乾燥条件（乾燥温度、風速、絶対湿度）が乾燥速度や麺の発泡現象に及ぼす影響を定量的に評価した。さらに、これまで殆ど報告例のない蒸し工程（プレクッキング）を加えた麺類の乾燥データの収集を行い、蒸し工程が乾燥に与える影響を定量的に評価した。これらの知見をもとに、乾燥工程を効率的に行うための乾燥条件を見出し、環境負荷を低減する新たな麺類の乾燥方法の提案を行うことを目的とした。

【乾燥装置及び方法】

乾燥試験には強制対流式の乾燥装置を使用した。この乾燥装置では、乾燥操作における重要な条件因子である温度に加え、乾燥空気の風速と湿度の調整が可能であり、これらの条件因子の組み合わせが乾燥特性に与える影響を検討することが可能である。装置内の熱風発生部において乾燥条件に合わせて乾燥空気の温度と風速を設定し、さらに、ボイラーで発生させた蒸気を適量導入することにより乾燥空気の湿度を調整する仕組みとなっている。金網（目開き 12mm）に麺皮を乗せ、上部より強制対流により熱風を吹き付け、乾燥操作を行った。乾燥装置が所定の乾燥条件で定常状態に達した後、乾燥空気の温度、絶対湿度、風速の測定を行った。

強制対流による乾燥試験では、乾燥空気の温度 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130℃、風速 0.0, 2.0, 4.5, 6.0m/s、絶対湿度 0.0, 0.15, 0.25, 0.45kg/kg-DA に設定し、乾燥期間中の麺皮の重量変化を電子天秤で測定し、記録した。

【実験結果及び考察】

1. 生皮の乾燥特性

生皮（乾麺の中間原料モデル）の乾燥における乾燥空気の温度、風速、絶対湿度の乾燥速度に与える影響を定量的に明らかにする目的で、各乾燥条件下での生皮の重量変化を乾燥時間毎に測定し、

乾燥データを収集・整理した。その結果、乾燥温度の増加により、生皮の乾燥速度が増加することが明らかとなった。また、乾燥空気の風速の増加により生皮の乾燥速度も増加することが明らかとなった。特に、乾燥温度 100℃以上では、乾燥速度に与える乾燥空気風速の影響が非常に大きいことを定量的に示すことができた。さらに、乾燥温度 120～130℃では、絶対湿度の増加により生皮の乾燥速度が増加することを明らかにした。しかし、乾燥温度 100～110℃では、絶対湿度の増加による生皮の乾燥速度の変化は殆どなかった。乾燥空気の絶対湿度による乾燥速度の変化は、生皮乾燥時の表面積の変化が原因であることを明らかにした。

②蒸皮の乾燥特性

蒸皮（即席麺の中間原料モデル）の乾燥における乾燥空気の温度、風速、絶対湿度の乾燥速度に与える影響を定量的に明らかにする目的で、各乾燥条件下での蒸皮の重量変化を乾燥時間毎に測定し、乾燥データを収集・整理した。その結果、乾燥温度の増加により、蒸皮の乾燥速度も増加することが明らかとなった。また、乾燥空気の風速の増加により蒸皮の乾燥速度も増加することが明らかとなった。特に、乾燥温度 100℃以下では、風速 2.5m/s 以上で、乾燥速度が殆ど変化しないことを明らかにした。さらに、乾燥空気の絶対湿度の増加により、蒸皮の乾燥速度は減少傾向を示すことを明らかにした。これらの乾燥条件による乾燥速度の減少は、蒸皮の乾燥における表面積の減少に起因すると考えられる。また、乾燥空気の風速を増加させても乾燥速度が低下しない原因として、蒸皮内部の水分移動速度に温度依存性が存在することを明らかにした。

③生皮及び蒸皮の乾燥速度パラメーター

強制対流乾燥における生皮及び蒸皮の乾燥特性を定量的に評価するために、生皮、蒸皮の乾燥データを整理し、乾燥速度式を用いて乾燥特性の解析を行った。その結果、生皮、蒸皮の含水率変化は Henderson & Pabis モデル（式 1）と高い相関性（ R^2 係数が 0.95 以上）があることを明らかにした。ただし、 W は含水率 (kg-water/kg-solid)、 a は乾燥速度定数 (-)、 k は乾燥速度係数 (1/s)、 t は乾燥時間 (s)、 T は乾燥温度 (°C)、 v は乾燥空気の風速 (m/s) である。

$$W = a \exp(-kt) \quad (\text{式 1})$$

* 生皮の強制対流乾燥における乾燥温度、風速が含水率に与える影響

$$a = 1.22 \times 10^{-3} \cdot T + 0.334$$

$$k \times 10^4 = (9.29 \times 10^{-4} \exp(0.0582T)) \cdot v + 0.40 \exp(0.0218T)$$

④各乾燥条件における乾燥効率の評価

乾燥効率の指標として有効拡散係数を用い、生皮及び蒸皮の乾燥における乾燥空気の温度、風速、絶対湿度が乾燥特性に及ぼす影響を評価した。その結果、生皮と蒸皮ともに乾燥空気温度が 100℃以上の条件でのみ、乾燥空気風速の増加が乾燥効率の上昇に影響することを明らかにした。また、生皮の乾燥では、乾燥温度 110℃以上の条件でのみ、絶対湿度の増加が有効拡散係数の上昇に影響することを明らかにした。一方、蒸皮の乾燥では、絶対湿度の増加に伴って有効拡散係数が減少する傾向を示した。絶対湿度の生皮の乾燥における影響は表面積の増加による乾燥速度の増加が原因であると考えられる。また、絶対湿度の蒸皮の乾燥における影響は麺皮の周りの湿度が高いことによる表面からの蒸発速度の減少に起因していると考えられる。適切な乾燥条件（乾燥温度、風速、絶対湿度）を設定することで、乾燥速度を増加させることができ、乾燥の効率化を達成できる可能性を示すことができた。

⑤麺皮の乾燥条件の提案

麺類の製造における乾燥時間の短縮化による消費エネルギーの低減を目的として、次のような乾燥時間短縮スキームを立てた。

『初期乾燥時の乾燥温度の増加→被乾燥物の品温を上昇速度の増加→乾燥時間の短縮』

すなわち、乾燥開始から 300 秒間、乾燥温度を 100℃から 120℃に上昇させ、被乾燥物の品温を短時間で上昇させる。それと共に、絶対湿度を 0.15kg/kg-DA に設定し、生皮の収縮を防止し、表面積を増加させる。次の 900 秒間、絶対湿度は 0.15kg/kg-DA に固定し、乾燥温度を 120℃から 100℃に戻す。最後に、乾燥温度 100℃から 120℃に上昇させ、風速を 4.5m/s から 2.5m/s に減少させ、

絶対湿度を 0.15kg/kg-DA から 0kg/kg-DA に減少させる。

そこで、上記の乾燥時間短縮スキームを基に乾燥条件を設定し、生皮及び蒸皮の乾燥試験を行った。その結果、生皮の乾燥において基準乾燥条件（乾燥温度 100℃、風速 4.5m/s、絶対湿度 0kg/kg-DA）では、含水率 0.165 になるまでの乾燥時間が 1,800 秒要したが、本研究で新たに提案した乾燥条件では 1,350 秒となり、25%の乾燥時間の短縮効果が認められた。同様に、蒸皮の乾燥では、含水率 0.165 になるまでの乾燥時間が 1,800 秒から 1,250 秒となり、30%の乾燥時間の短縮効果が認められた。加えて、新たな乾燥条件で得られた乾燥麺皮では乾燥中の発泡現象も認められず、品質も極めて良好であった。

次に、麺類の製造における乾燥工程に乾燥時間短縮スキームを当てはめ、実際の製造ラインでの乾燥工程の効率化について、その効果を評価した。その結果、生皮では乾燥時間が 4 分の 3 に、蒸皮では乾燥時間が 10 分の 7 に短縮されることが明らかとなった。この乾燥時間の短縮は、連続生産では乾燥機のベルトコンベアー長の短縮に繋がる。これに伴い乾燥機内の加熱空間（乾燥室の体積）を削減できることから、加熱空間を暖める熱量の恒常的な削減が可能になる。また、提案した乾燥条件は風速を低く抑えており、送風ファンを小型にすることができるため、送風ファンの設置及び運転に係る費用を抑制できる利点もある。そこでこれらの効率化の効果を、一般的な生産規模での即席麺の工場（年間 2,420 万食の生産規模）を想定して、消費エネルギーの低減効果として試算したところ、年間あたり、26.5 万 kWh 程度の省エネルギー効果があり、CO₂ に換算すると 90.0 トンに相当する温室効果ガスの削減効果があることが明らかとなった。

本研究での基礎的な乾燥データを適用すると、乾燥効率の優れた、かつ品質劣化のない最適な乾燥条件を見出すことができることを示すことができた。これらの知見は、新しい製造ラインの効率化（省エネルギー、省スペース）の実現、乾燥条件決定に伴う予備的な試験の簡略化に貢献できる。