食品冷却装置の冷却効率向上に関する研究

浦井　和彦*　　本多　章作*　　佐藤　亨*　　木嶋　祐太*

Research on the improvement in cooling efficiency of a food cooler

URAI Kazuhiko*,　HONDA Shosaku*,　SATO Toru*　and　KIJIMA Yuuta*

抄　録

冷蔵食品の無菌化包装技術の一つである半殺菌チルド法[1)]は、パッケージング後に加熱水槽で加熱殺菌して速やかに冷蔵温度まで冷却する方法である。この方法では食品内部の温度管理が重要であるため、装置を設計するにあたって食品内部温度が目標値になるように処理条件を決定する必要がある。本研究では、この方法による豆腐の加熱殺菌装置を対象としてその冷却過程に注目し、豆腐内部温度を目標値まで低下させるために必要とされる冷却装置の処理条件について検討した。

1. 緒　　言

近年、食品の偽装表示事件などを契機として食品の安全に対する消費者の関心が高まっており、食品加工業では冷蔵食品の殺菌処理を益々徹底し信頼性を高めることが重要になっている。

豆腐やかまぼこなど冷蔵食品の殺菌処理方法の一つとして、パッケージング後に加熱水槽で加熱殺菌した後に冷却する方法（半殺菌チルド法）がある。この方法は、常圧・低温の下で処理できるため容器やパッケージング方法を選ばないが、完全には滅菌できないため、加熱温度・時間の管理はもちろんのこと、細菌増殖温度以下への速やかな冷却も重要となる。また、食品の処理温度は内部まで目標どおりに制御されることが必要となるが、内部温度の変化は同一条件下においても食品の種類や形状によって異なるため、食品の種類毎に処理条件を検討する必要がある。本研究では、製造の現場で稼働している豆腐の加熱殺菌装置を対象として冷却処理直後の豆腐内部温度を冷蔵温度まで低下させることを目的とし、装置の改善方法を検討した。その手段として熱伝導シミュレーションを用いて殺菌工程における豆腐内部の温度変化を推定し、殺菌処理装置に要求される処理条件を導き出した。

*　上越技術支援センター

2. 装置概要

改善対象とした装置は、食品加工業者で使用されているパッケージ入り豆腐の加熱殺菌装置である。コンベアに載せられた豆腐は加熱水槽、冷却水槽の順に一定速度で通過して殺菌処理される。加熱時間は 35 分、加熱水槽から冷却水槽までの移行時間は 10 分、冷却時間は 40 分、冷却水温度は 2℃に設定されている。

3. 豆腐の温度測定

始めに冷却過程における豆腐の各部温度変化を測定し、豆腐の冷却状況を調査した。

豆腐の温度測定箇所は、豆腐の中心、豆腐パッケージ上面の中央、豆腐の周辺温度として豆腐パッケージから 2cm 離れた場所の計 3 箇所とし、サーミスタ型薄膜温度センサーを取り付けた。データの収集には小型データロガー（図 1）を用い、豆腐と共にコンベアに載せて測定した。

測定結果を図２に示す。豆腐の中で最も温度追従の遅れる中心温度が冷却直後に約 18℃になっているが、これを冷蔵温度の 10℃以下にすることが目標となる。

図１　データロガーと豆腐

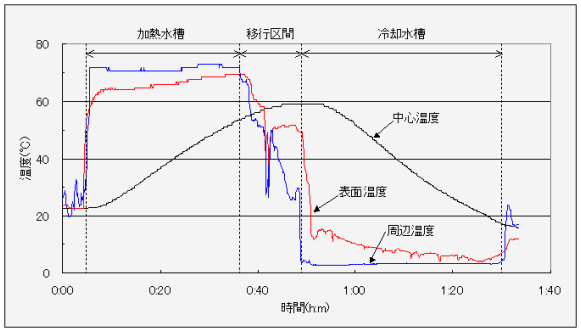

図２　豆腐の温度変化

4. 対策の検討

温度測定結果を考察し豆腐内部温度の低減対策について検討した。

4.1　表面温度の低減

豆腐の表面温度は表面上の冷媒による熱の伝え易さ（熱伝達特性）に影響を受ける。その物理量である熱伝達係数が十分に大きければ豆腐の表面温度は冷媒の温度に近づいて豆腐内部の熱勾配が大きくなるため熱放出が増えて豆腐の温度が下がり易くなる。すなわち、表面温度の高い区間で豆腐表面の熱伝達係数を上げる工夫をすることで冷却効率を向上させることができると考えられる。測定結果では表面温度が高い部分が冷却水槽に入る前の移行区間と冷却水槽に入った直後からしばらくの間に見られる。

4.1.1　移行区間の冷却

加熱水槽から冷却水槽への移行区間では約 10 分間空気中にさらされる。この区間では現在井戸水（約 15℃）のシャワーで 1～2 分間ほど冷却しているが、それ以外の 8～9 分間では豆腐の表面温度が高い状態となっている。空気より熱伝達係数の大きい水をかける範囲を増やして表面温度を下げることによって冷却効果を上げる余地があると考えられる。

4.1.2　冷却水槽内の流速増加

冷却水槽中では、豆腐の表面温度は冷却水槽入口付近で最も大きく、冷水との温度差は10℃ほどある。熱伝達係数は流速の増加によって大きくなるため、なんらかの方法で豆腐表面の流速を増すことによって冷却効果が上がると考えられる。

4.2　冷却時間の延長

冷却時間を延長した場合についてその冷却効果を検討する。その手段としてコンベアの移動速度を低下させた場合と冷却水槽を延長した場合の 2 通りを考える。

5. 熱伝導シミュレーション

流速の増加と冷却時間の延長をした場合について、熱伝導計算によって豆腐内部温度変化のシミュレーションを実施し、その効果を推定した。

熱伝導計算で必要となる豆腐の物性値のうち、熱容量は熱物性測定装置（TPA-501）で測定した。また、熱伝導率、熱伝達係数は、豆腐の温度測定曲線に対して熱伝導計算でカーブフィッティングすることによって導き出した。

5.1　冷却水槽内の流速増加

測定結果では冷却水槽に入った直後に表面温度の一時的な低下が見られるが、これは流速の早い水面付近をコンベアが通過するためと考えられる（図 3）。水面から冷水に入ったコンベアはやがて水槽底部に至り隙間無く並んだ豆腐収容ケースが流れと平行に進むため、底部移動時は豆腐に冷水が通り抜けにくい状況にあると思われる。冷水に入った直後の熱伝達係数は底部移動時の 400W/m^{2}K に対して 2 倍の 800W/ m^{2}K で計算曲線とほぼ一致する。

図 4 は、底部移動時の熱伝達係数 400W/m^{2}K から値を増加させた場合について熱伝導シミュレーションを行い、冷却直後の豆腐中心温度を計算したもの

である。熱伝達係数を冷却水槽内全域で水面付近と同じ 800W/m^{2}K にした場合に 2℃程度低下することが予想される。このことは、冷却水循環ポンプ能力の増強による増流がなくても豆腐表面の流速が増えるように流路を改善することでこの程度の効果が期待されることを示唆している。具体的な方法としては、収容ケースの開口率を上げること、水面の水流が下部へ抜けて豆腐周辺に流れができるように流路を変更することなどが考えられる。

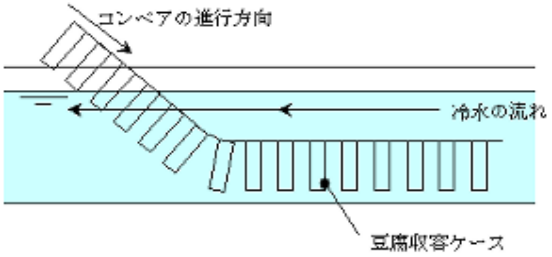

図３　冷却水槽内の水流

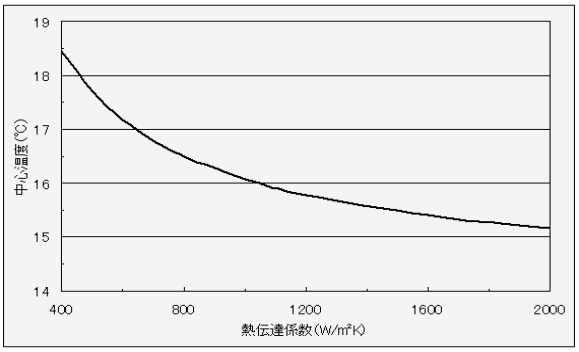

図４　豆腐中心温度の熱伝達係数依存性

5.2　冷却時間の延長

コンベアの速度を落とした場合を想定し、加熱水槽、移行区間、冷却水槽を通過する時間を延ばしてシミュレーションを実施した（図 5）。その結果、冷却直後の中心温度を目標の 10℃まで低下させるには 40%の時間延長（全工程で 34 分の延長）が必要になると予想された。また、速度をそのままに冷却水槽の長さを延長した場合には 40%の延長で目標を達成できることが予想された。

6.　移行区間の冷却試験

移行区間における井戸水シャワーの冷却効果についてはシミュレーションが困難であるため、実際に仮設シャワーを設置して実験した。シャワー区間をおよそ 5 分間に拡張して豆腐の温度を測定したが、既設シャワー使用時と比べて明確な効果の違いが見られなかった。測定結果では仮設シャワーで表面温度が十分に低下しておらず、収容ケースに阻まれて井戸水が効率よく豆腐に当たっていないことが原因と考えられる。

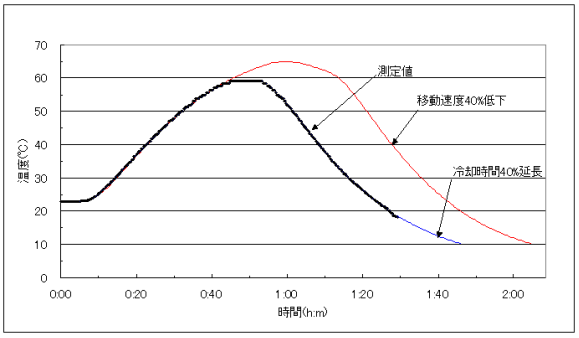

図５　豆腐中心温度の熱伝導計算
（冷却時間を延長した場合）

7.　結　　言

（1）熱伝導シミュレーションの結果では、冷却水槽内の水流改善によってある程度の冷却効率の向上は見込めるが、それだけでは目標の達成が難しいと推測された。

（2）目標を達成する方法としてコンベアの速度低下または冷却水槽の延長をした場合、いずれも 40%程度の時間延長が必要であると推測された。

（3）移行区間の冷却方法については、収容ケースの開口率を上げてシャワーが掛かり易くするなどまだ検討する余地があると思われる。

（4）今回、冷却対策の検討とその効果の予測はできたが、実機の改良と検証をするまでには至らなかったため、その信頼性の評価が今後の課題となる。

参考文献

1）横山理雄, “豆腐の包装技術”, 豆腐年鑑, 1999, P146.