

トピックス

食品の凍結と乾燥：物性値の測定とシミュレーション

現在、凍結乾燥法はインスタントコーヒーに代表される食品産業やワクチンなどの医療分野などで幅広く応用されている。凍結乾燥法は物理的・化学的変性の少ない高品質な乾燥製品が得られる乾燥技術であることから、食品産業分野での適用範囲のさらなる拡大が期待されている。一方、従来の乾燥法と比較してコスト面で割高であり、これを改善するために凍結乾燥装置の最適運転操作法を確立することが望まれている。食品材料の凍結乾燥速度は材料乾燥層の熱および物質移動速度に律速されるので、これを予測するためには材料に形成される乾燥層の移動物性値、すなわち熱伝導率と水蒸気の透過係数を非定常法で測定することが不可欠となる。しかしながら、凍結乾燥食品の移動物性値を定量的に測定した研究例は数少なく、また材料の凍結挙動を予測することが困難であるため、乾燥の前処理としての凍結工程を含めた凍結乾燥の全工程の最適化を検討することが不可能な現状にある。

そこで、食品材料の最適乾燥プロセスを検討するために、高濃度塩分材料の代表としてミソペーストを、成形加工食品の代表として卵スープをそれぞれ試料に選び、その凍結乾燥特性と乾燥層の熱伝導率および透過係数を測定した結果、両試料ともその表面温度は55℃まで設定可能であることがわかった。また、高濃度塩分材料の乾燥速度は熱移動律速であること、熱伝導率は試料濃度が高いほど大きな値を示すこと、透過係数は圧力依存性を有することがそれぞれ認められた。また、卵スープについては、乾燥時間の短縮および24hr以

内の乾燥サイクルの実現可能性が示唆された。

また、細胞質材料の代表としてスライスリングを、比較対照試料としてすりおろしリングを選び、スライス試料については両面輻射加熱方式、すりおろし試料については片面輻射加熱方式によりそれぞれ凍結乾燥した。その結果、スライス試料では表面温度を10℃以上に設定することが困難であったのに対し、すりおろし試料では70℃まで設定可能であった。また、両試料の移動物性値を比較すると、熱伝導率はほぼ同じ値を示すのに対し、すりおろし試料の水蒸気の透過係数はスライス試料の4倍以上大きい値を示した。さらに、すりおろし試料の移動物性値に及ぼす凍結速度の影響が顕著にみられ、とくに透過係数は凍結速度により決まる材料内部の氷結晶サイズに依存することがわかった。これらの結果から、組織の構造が破壊されたと考えられるすりおろし試料の乾燥速度は熱移動律速であるのに対し、スライス試料の乾燥速度は材料乾燥層を通過する水蒸気の移動抵抗により律速されることが確認された。さらに、細胞質材料の透過係数を予測するために、従来のモデルを補正し、水蒸気移動に対する細胞膜抵抗を考慮した材料構造モデルを提唱した。本モデルでは、均一な円柱状の細胞が直列に配置されており、それぞれの細胞膜が固有の膜抵抗値を有しているものと仮定した。また、顕微鏡観察の結果から、細胞の平均半径を150 μm とし、スライス試料の細胞膜一枚の膜抵抗値を本モデルにより推算した。このようにして、細胞質材料を試料とした乾燥実験より透過係数値を計算し、他方乾燥材料の顕微鏡観察などにより細胞一個のサイズがわかれば、ここに述べたモデルにより単一細胞膜の水蒸気移動抵抗値を計算することが可能となった。すなわち、膜抵抗値推算モデルは、リングだけではなく他の細胞質材料の透過係数を予測するための1つの手法として利用可能であると考えられる。

さらに、凍結乾燥の前処理凍結プロセスを一次的にシミュレーションすることを目的として、既往の生体凍結モデルを簡略化した。同モデルは凍害防御剤を用いた生体組織の凍結保存プロセスを正確に記述しており、具体的には熱・物質同時

荒木徹也 (Tetsuya ARAKI)

東京大学 大学院農学生命科学研究科 農学国際専攻

1996年 東京大学農学部卒業

1999年 東京大学大学院農学生命科学研究科 (博士前期課程) 修了

2002年 東京大学大学院農学生命科学研究科 (博士後期課程) 修了

2003年 日本学術振興会特別研究員 (PD)

2005年 東京大学大学院農学生命科学研究科助手

2008年 東京大学大学院農学生命科学研究科講師

2010年 東京大学大学院農学生命科学研究科准教授 (現職)

移動方程式，細胞膜の透過係数計算，熱平衡状態を仮定した細胞外凝固モデルおよび細胞内氷核生成モデルに従って過冷却が起きるものとする細胞内凝固モデルから構成される．簡略化モデルにおいては，同モデルにおける細胞外凝固モデルおよび熱伝導方程式のみを食品材料に対して適用し，これを三層凍結モデルと組み合わせることにより，食品材料を対象とする新たな簡略化凍結モデルを開発した．凍結材料は冷却面に近い層から凍結層，移動境界層および未凍結層の3層からなり，未凍結層と移動境界層との界面が材料表面に到達すると同時に未凍結層は消滅し，凍結層が形成されるものと仮定した．また各層の界面温度はそれぞれ相図上の凍結点および共晶点温度で一定とした．モデル計算は2つのステップに分けられ，第一段階では界面移動速度を移動温度点法により計算し，凍結時間の関数として表現する．そして界面移動速度の時間回帰式を入力データとし，第二段階の数値計算で三層凍結モデルを用いることにより，固定点温度の経時変化を求めることが可能となる．

溶液系食品材料の代表としてコーヒー水溶液を試料に選び，DSCによる示差熱量データから凍結点を求め，試料の凍結挙動を予測するために必要な相図を作成した．その結果，本研究で得られた

相図はグルコースのそれとほぼ同じ値を示した．このことから基本的にはコーヒー溶液の凍結挙動はグルコース水溶液のそれと同様であり，凝固点降下の予測には通常用いられる擬二成分系モデルの適用が可能と考えられた．また，熱物性値は全て温度の関数として定式化し，とくに有効熱伝導率は水を分散相とするモデルを用いて記述した．

以上述べた簡略化モデルを用い，相図および熱物性値を入力データとしてコーヒー水溶液の凍結プロセスを一次元的に計算し実測データと比較したところ，両者は良好に一致した．このように，溶液系材料の凍結挙動を正確に再現することが可能となった．とくに凍結界面の移動速度は，材料内部に形成される氷結晶のサイズとの相互関連性を検討する上で有力な定量的指標となるものと考えられた．溶液系食品材料の凍結プロセスシミュレーションに関する残された課題として，(1)熱物性値の取り扱いが複雑であること，(2)試料ごとの相図測定が必要であること，(3)凍結濃縮の進行による体積膨張の影響を考慮する必要があること，(4)界面移動速度の取り扱い，(5)共晶点温度の取り扱い，および(6)高濃度領域の取り扱いの6点を挙げた．