

液体噴流攪拌を用いた食品抽出操作に関する実験的研究

学位論文内容の要旨

攪拌は多くの産業で重要な役割を持ち、目的に応じた攪拌方法が用いられている。食品工業では一般的な攪拌方法として機械式攪拌が利用されており、目的、状況、物性に応じ多様な攪拌翼が開発されてきた。

一方で、機械式攪拌が困難な状況がある。例えば食品からの抽出操作では、水を抽剤、骨を抽料としてエキスを抽出するといった状況において機械式攪拌を利用すると、衝突により攪拌子の破損を招く恐れがある。このような場合、攪拌子を用いない非機械式攪拌が好ましい。そこで本研究では、非機械式攪拌である液体噴流攪拌を食品抽出操作に適用することを考え、モデル実験を通してその利用可能性を検討した。すなわち鶏がら、豚骨などの食品を模擬した被攪拌物（食品モデル）を液体噴流により攪拌し、食品モデルが液体噴流に与える影響、またその逆の液体噴流により攪拌される食品モデルの挙動について調査した。さらに、液体噴流の物質移動促進効果については氷球を用いたモデル実験を行い、液体噴流による氷球溶解の予測式を提案した。なお、液体噴流によって攪拌される円筒浴内の流れ場は次のように特徴づけられる。

円筒容器内に所定の深さまで液体を入れ、例えば容器底部中央に設置した単孔ノズルから液体を噴出させると、特定の条件下で旋回現象が発生する。この液体噴流の旋回現象は、浴深 H_L と容器径 D の比であるアスペクト比がおおよそ 0.3 を境に浅水波型旋回現象 ($H_L/D < 0.3$) と深水波型旋回現象 ($H_L/D \approx 0.3 \sim 1.69$) に分けられる。特に深水波型旋回現象は噴流の半径方向への広がりが大きいため攪拌の高効率化が期待できる。ただし、食品を浴内に投入した場合に液体噴流で攪拌を行うと旋回現象が抑制されるため、旋回が発生しない条件についても検討を行った。

以下に本学位論文の概要を示す。

第 1 章 緒論

従来の食品加工プロセスにおける抽出操作について述べるとともに本学位論文の構成を示した。

第 2 章 円筒容器内旋回液体噴流の振幅

液体噴流で攪拌する際、旋回現象が発生する条件では浴表面において波が発生するため、実機設計の際、液体が容器外へ飛び出さないように周期的な波の運動の振幅の情報が必要となる。本章では浴内に液体のみが存在する場合の旋回現象の基本特性のうち、特に振幅について調査した。

第 3 章 鶏がらモデルが円筒容器内旋回液体噴流に与える影響

鶏がら(鶏骨)のモデルにポリアセタール製の楕円体を被攪拌物として用い、巡回液体噴流に与える影響について調査を行った。巡回液体噴流の基本特性のうち(1)巡回発生領域、(2)巡回周期、(3)振幅、(4)巡回開始時間、(5)巡回終了時間について調査した。また測定値は既存の被攪拌物がない場合に提案されている実験式および理論式と比較検討した。

第4章 円筒容器内で水噴流によって攪拌される豚がらモデルの挙動

食品を液体噴流で攪拌した際に、食品が浴内をどのように運動しているのかを知ることは操業上非常に重要な因子である。本章では豚がら(豚骨)のモデルにアクリル球を用い、液体噴流で攪拌したときのアクリル球の挙動を調査した。液体噴流で攪拌された球は浴内を循環する様子が観察されたことから、球が浴内を循環する時間である平均循環時間および噴流によって浴内に浮上する球の個数について調査し、それらの整理法を検討した。

第5章 円筒容器内で水噴流によって攪拌される豚がらモデルの衝突挙動

第4章でアクリル球を円筒浴内において液体噴流で攪拌した際、浴内ではアクリル球同士あるいはアクリル球と容器側壁との衝突が頻繁に生じた。このような現象が現れるとアクリル球の周りの境界層が薄くなり、抽出効率の向上が期待できる。そこで本章では、球と球あるいは球が容器側壁に衝突する際に発生する突発的な衝突音を被攪拌物の衝突頻度の測定に利用し、衝突頻度を明らかにした。

第6章 水噴流によって攪拌される豚がらモデルが円筒浴内の流速に及ぼす影響

第4章、第5章で述べた実験では、アクリル球が噴流によって浮上することが観察された。その結果として噴流の速度低下が考えられることから、レーザードップラー流速計(LDV)を用いて噴流の鉛直方向成分の中心軸上流速と、中心軸近傍の半径方向の速度分布を求め、被攪拌物が流速に与える影響について調査した。

第7章 水噴流によって攪拌される円筒浴内の氷球溶解に関する実験

一般的に、強制対流条件下では、熱伝達と物質移動に相似性があることが知られている。これに着目し、氷球を食品モデルとして用いて液体噴流で攪拌を行った。氷球の溶解から熱伝達係数を求めることで、液体噴流を用いた場合の物質移動係数を予測することを目的とした。氷球溶解に対する容器径、ノズル径、浴深、吹き込み水流量等の影響を調査し、液体噴流による氷球溶解の予測式を提案した。

第8章

本章では、第2～7章の成果を要約するとともに、実用化に向けての課題と展望について述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 井 口 学

副 査 教 授 荒 井 正 彦

副 査 准教授 大 参 達 也

学 位 論 文 題 名

液体噴流攪拌を用いた食品抽出操作に関する実験的研究

攪拌は多くの産業で重要な役割を持ち、多岐にわたる種類の攪拌方法が用いられている。食品工業では一般的な攪拌方法として機械式攪拌が利用されており、目的、状況、物性に応じ多様な攪拌翼が開発されてきた。一方で、機械式攪拌が困難な状況がある。例えば食品からの抽出操作では、水を抽剤、骨を抽料としてエキスを抽出するといった状況において機械式攪拌を利用すると、衝突により攪拌子の破損を招く恐れがある。このような場合、攪拌子を用いない非機械式攪拌が好ましい。そこで本研究では、非機械式攪拌の1種である液体噴流攪拌を食品抽出操作に適用することを考え、モデル実験を通してその利用可能性を検討した。すなわち鶏がら、豚骨などの食品を模擬した被攪拌物(食品モデル)を液体噴流により攪拌し、食品モデルが液体噴流に与える影響、またその逆の液体噴流により攪拌される食品モデルの挙動について調査した。さらに、液体噴流の物質移動促進効果については氷球を用いたモデル実験を行い、液体噴流による氷球溶解の予測式を提案した。なお、液体噴流によって攪拌される円筒浴内の流れ場は次のように特徴づけられる。

円筒容器内に所定の深さまで液体を入れ、例えば容器底部中央に設置した単孔ノズルから液体を噴出させると、特定の条件下で旋回現象が発生する。この液体噴流の旋回現象は、浴深と容器径の比であるアスペクト比がおよそ0.3を境に浅水波型旋回現象と深水波型旋回現象に分けられる。特に深水波型旋回現象は噴流の半径方向への広がりが大きいため攪拌の高効率化が期待できる。ただし、食品を浴内に投入した場合に液体噴流で攪拌を行うと旋回現象が抑制されるため、旋回が発生しない条件についても検討を行った。

以下に本学位論文の概要を示す。

第1章 緒論

従来の食品加工プロセスにおける抽出操作について述べるとともに本学位論文の構成を示した。

第2章 円筒容器内旋回液体噴流の振幅

液体噴流で攪拌する際、旋回現象が発生する条件では浴表面において波が発生するため、実機設計の際、液体が容器外へ飛び出さないように周期的な波の運動の振幅の情報が必要となる。本章では浴内に液体のみが存在する場合の旋回現象の基本特性のうち、特に振幅について調査した。

第3章 楕円粒子が円筒容器内旋回液体噴流に与える影響

鶏がら(鶏骨)のモデルにポリアセタール製の楕円体を被攪拌物として用い、旋回液体噴流に与える影響について調査を行った。旋回液体噴流の基本特性のうち(1)旋回発生領域、(2)旋回周期、(3)振幅、(4)旋回開始時間、(5)旋回終了時間について調査した。また測定値は既存の被攪拌物が

ない場合に提案されている実験式および理論式と比較検討した。

第4章 円筒容器内で水噴流によって攪拌される球状粒子の挙動

食品を液体噴流で攪拌した際に、食品が浴内をどのように運動しているのかを知ることは操作上非常に重要な因子である。本章では豚がら(豚骨)のモデルにアクリル球を用い、液体噴流で攪拌したときのアクリル球の挙動を調査した。液体噴流で攪拌された球は浴内を循環する様子が観察されたことから、球が浴内を循環する時間である平均循環時間および噴流によって浴内に浮上する球の個数について調査し、それらの整理法を検討した。

第5章 円筒容器内で水噴流によって攪拌される球状粒子の衝突挙動

第4章でアクリル球を円筒浴内において液体噴流で攪拌した際、浴内ではアクリル球同士あるいはアクリル球と容器側壁との衝突が頻繁に生じた。このような現象が現れるとアクリル球の周りの境界層が薄くなり、抽出効率の向上が期待できる。そこで本章では、球と球あるいは球が容器側壁に衝突する際に発生する突発的な衝突音を被攪拌物の衝突頻度の測定に利用し、衝突頻度を明らかにした。

第6章 水噴流によって攪拌される球状粒子が円筒浴内の流速に及ぼす影響

第4章、第5章で述べた実験では、アクリル球が噴流によって浮上することが観察された。その結果として噴流の速度低下が考えられることから、レーザードップラー流速計(LDV)を用いて噴流の鉛直方向成分の中心軸上流速と、中心軸近傍の半径方向の速度分布を求め、被攪拌物が流速に与える影響について調査した。

第7章 水噴流によって攪拌される円筒浴内の氷球溶解に関する実験

一般的に、強制対流条件下では、熱伝達と物質移動に相似性があることが知られている。これに着目し、氷球を食品モデルとして用いて液体噴流で攪拌を行った。氷球の溶解から熱伝達係数を求めることで、液体噴流を用いた場合の物質移動係数を予測することを目的とした。氷球溶解に対する容器径、ノズル径、浴深、吹き込み水流量等の影響を調査し、液体噴流による氷球溶解の予測式を提案した。

第8章 結論

本章では、第2～7章の成果を要約するとともに、実用化に向けての課題と展望について述べた。これを要するに、著者は、非機械式攪拌である液体噴流攪拌を用いて物質移動、ひいては食品抽出操作における抽出効率を向上させる方法を見出し、実用化への可能性を明らかにしており、材料科学ならびに食品工学に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。