

学 位 論 文 題 名

Development of the Air-flow Type of Mill Suitable
for Fine Pulverization of Adhesive Materials

(付着性原料の微粉碎に適した気流式粉碎機の開発)

学位論文内容の要旨

食品、化学、工業などの分野を問わず、微粒子は古くから様々な製品で利用されており、今日では製品の高機能化や生産効率向上のために、この微粒子に対するニーズが多様化している。例えば、食品産業においては、茶葉、大豆、コーヒー豆などの食材を数～数十マイクロメートルの微粒子にして、これまで廃棄していた部位の有効利用と栄養素の吸収効率向上を図るため、微粒子を利用した加工食品の研究が盛んになっている。微粒子のニーズの多様化に伴い、微粒子製造のための粉碎技術についても革新が求められている。一般に、乾式粉碎機によって付着性の強い原料（以下、付着性原料）を微粉碎する場合、粉碎機内部に大量の微粒子が付着するため長時間の連続運転は難しく、頻繁に粉碎機を停止して内部を清掃しなければならない。また、その付着物が粉碎機内部で激しく擦れると、粉碎機内の温度が上昇して微粒子の熱変性や粉碎機内壁での微粒子の溶着が起こる。一方、湿式粉碎や低温・凍結粉碎は付着性原料の微粉碎に対して有利であるが、原料が水溶性の場合や微粒子の用途によっては湿式が適さない場合もあり、また液体窒素等を用いる低温・凍結粉碎は運転コストが高いという難点がある。つまり、付着性原料を乾式で微粉碎したい場面が多いにも関わらず、生産性や品質の両面において優れた粉碎技術は依然として確立されていないのが現状である。本研究では、乾式の気流式粉碎機の内部流れについて、流体力学的検討を加えると共に、多くの粉碎実験をとおして粉碎機構の理解と性能改善に努め、さらに粉碎事例を基に付着性原料に対する適用性について考察する。

気流式粉碎機とは、広義で粉碎原料を気流の中で粉碎する方式のものを指すが、その一般的な特徴として、以下のことが挙げられる：(1) 気流が粉碎熱を奪い取るため粉碎温度が比較的低い。(2) 気流によって粒子を互いにあるいは粉碎機内壁面に衝突させることによって、数マイクロメートル（原料や条件によっては数百ナノメートル）スケールまで微粉碎できる。(3) 粉碎機の内部形状が平滑であれば気流が剥離力として働き、壁面の付着粒子が再飛散し易い。本研究で用いた粉碎機は、粉碎温度が外気温度に対して 10～15℃以下で比較的低温、また内部形状が平滑であるため、付着性原料の微粉碎において長時間の連続運転が期待できる。

研究対象である粉碎機のシャフトには、2 枚のインペラが所定の間隔で取り付けられており、同一方向および同一速度で回転して媒体ガスと原料に旋回力を与える。粉碎原料は、媒体ガスとしての一次空気と一緒に投入口から導入される。粉碎機吐出口は別置きファンによって吸引されており、2 枚のインペラによって旋回気流が形成される。粉碎された微粒子は旋回気流に乗って後段の捕集装置で回収される。粉碎部はその機能に応じて、導入領域 (I)、粉碎領域 (II)、分級領域 (III) に分けられる。まず、導入領域 (I) に導入された粉碎原料は、旋回気流に乗って旋回を始めると同時に、遠心力によってケーシング外周部に集まっていく。原料は、第一インペラを通過する際に、インペラ壁面と衝突したり、インペラで弾き飛ばされてケーシング壁面と衝突したりすることで、ある程度の大きさ

にまで粗粉碎される。2枚のインペラで挟まれた粉碎領域(II)では、翼間での流れが一様でないこと、粒子径に応じて抗力が異なるために、それぞれの粒子は異なる速度で運動する。このため、粒子どうしの衝突や粒子間での摩擦によって微粉碎が促進される。第二インペラから吐出口までの分級領域(III)では、所望の微粒子と再微粒化されるべき粗い粒子が分離される。この領域では、粒子には吐出口方向に向かう抗力と遠心力とが作用しており、粗い粒子は遠心力が大きいため粉碎領域(II)へ戻って再粉碎されるが、微粒子は吸引気流に乗って排出される。

透明ケーシングを用いた粉碎実験では、ケーシング最外周部の壁面からインペラ先端付近にかけての領域において、粒子が層を形成して旋回することが確認された(この層を流動層と呼ぶ)。流動層には遠心力の影響によって粗い粒子が多く集まっているが、粒子ごとに旋回速度が異なるため、粒子どうしの衝突・摩擦によって微粉碎がなされる。また、この透明ケーシングを用いて実際に粉碎を行い、分級領域(III)での粒子の動きを目視で観察した。この分級領域において、旋回中心に近いインペラの中心部ボス付近から流れ込んできた粒子が、ケーシング内壁に沿って気流とともに旋回運動した後、吸引気流によって粉碎机から排出される粒子と粉碎領域(II)に戻される粒子とが観察された。さらに、流動層よりも内側の領域の流れは流動層に阻まれて確認できないため、気相に対して三次元非定常CFD解析を行った。粉碎領域(II)において衝突する気流が確認され、この流れに乗った粒子が互いに衝突・摩擦することで微粉碎が促進されるものと推察される。また、これらの可視化実験やCFD解析から、分級領域(III)の内壁に沿って運動する粒子をモデル化し、その粒子に作用する抗力および遠心力と排出されるべき粒子径との関係について理論的な考察を加えた。

油分を多く含み、付着性原料の一つである大豆の粉碎実験により本粉碎机の基本特性を調べた。粉碎特性は、クリアランス(第2回転翼とケーシングとの隙間)、インペラの回転数、風量により決定され、付着が少なくなる最適な領域があることが確認された。これらのパラメータを最適に設定することによって、内壁での付着の成長を抑制し、付着性原料の長時間の連続運転が可能となる。コーヒー生豆を用いた粉碎試験では、粉碎机に導入する一次空気を冷却することで、常温の場合よりも付着が抑制されると共に粒度特性が細かくなることが確認された。また、静電気力による強い付着性を示す塩基化合物については、比誘電率の低いフッ素樹脂をケーシング材質に用いることで付着が無くなり、長時間の連続運転が可能となった。さらに、粉碎机内壁の表面粗さや壁面に対する粒子の入射角が付着に及ぼす影響について検証実験を行った。その結果、本粉碎机の内部形状や気流の流れは粒子の付着抑制に有効に働くため、付着性原料の微粉碎に適していることが裏付けられた。付着性原料の連続微粉碎を可能にする要点については次のようにまとめられる: (i) 付着の支配要因を特定する。(ii) 粉碎温度を低くする。(iii) 粉碎部での滞留時間を短くする。(iv) 気流を整えて付着粒子を再飛散させる。(v) 壁面を平滑にし、適切な材質を選定する。

一方、粒子径が小さくなるにつれて粒子の比表面積は大きくなるため、従来の気流式粉碎机では特に、香気成分が気流と共に散逸しやすいという問題があった。本研究では、この粉碎システムを改良し、従来式では系外に排気されていた媒体ガスを再び粉碎部に戻し、媒体ガスを循環させる閉回路システムを開発した。この閉回路システムによって微粉碎された焙煎コーヒー豆について香気成分を測定分析し、香気成分の散逸抑制に対する効果を検証した。この結果、閉回路システムでは、ピリジン、ピラジン、ピロールといったコーヒーのロースト香に関与する成分の散逸が抑制されることが判明した。また、香気成分の絶対量は、粉碎温度によっても変化し得ることが実験結果から示唆された。なお、この閉回路システムは、媒体ガスに窒素などの活性度の低いガスを用いることによって、微粒子の酸化の防止や粉塵爆発の防止を図ることを可能とする。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 川 重 雄

副 査 教 授 大 島 伸 行

副 査 教 授 井 口 学

副 査 准教授 渡 部 正 夫

学 位 論 文 題 名

Development of the Air-flow Type of Mill Suitable for Fine Pulverization of Adhesive Materials

(付着性原料の微粉碎に適した気流式粉碎機の開発)

本研究は、乾式の気流式粉碎機について、その内部流れの流体力学的検討により粉碎機構を明らかにし、成分の異なる付着性原料に対する本粉碎機の適用性を明らかにしたものである。本粉碎機は、二枚のインペラが一本のシャフトに取り付けられてケーシング内に収められた構造をしている。ケーシング内部は、原料導入口から第一回転翼までの導入領域、第一回転翼と第二回転翼までの粉碎領域、第二回転翼と吐出口までの分級領域からなっている。第一回転翼には適切な迎角が付けられ、回転による揚力発生に伴いこの回転翼を通過する軸方向の空気の流れが誘起される。第二回転翼には迎角が付けられていない。吐出口は別置ファンで吸引されており、粉碎された微粒子が旋回気流に乗って輸送され、後段の捕集装置で回収される。

まず、粉碎機内の三次元非定常流れに対して数値流体力学シミュレーションを行い、以下のことを明らかにした：(1) 導入領域には第一回転翼の回転による周方向の流れと回転翼を通過する軸方向の流れが共存し、全体の流れは周回半径を増大しつつ旋回するらせん状の流れとなっている。(2) 粉碎領域では、第一回転翼を通過したらせん状流れと、分級領域から第二回転翼とケーシングの隙間を通過して戻る流れが衝突する流れとなっている。(3) 分級領域では、第二回転翼を通過した流れがケーシング上のよどみ線を境に再び粉碎領域に戻る流れと、吐出口を通過して捕集装置に向かう流れが存在する。(4) 分級領域の内壁に沿って運動する粒子に作用する抗力と遠心力の関係から、吐出口を出る粒子のサイズの予測が可能である。

上記の三領域の流れをタフト法により可視化し、原料の粉碎機構を調べて、以下のことを明らかにした：(1) 第一回転翼先端とケーシングの内壁面の領域で、粒子が層を成して旋回する。この層には遠心力により粗い粒子が多く集まるが、粒子ごとに旋回速度が異なるため、粒子どうしの衝突と摩擦により粒子が粉碎される。(2) 粉碎領域では、数値流体力学シミュレーションで予測されたような流れの衝突が確認され、流れに乗った粒子が互いに衝突と摩擦を繰り返して粉碎が促進される。(3) 分級領域では、気流とともに旋回運動した後、吸引気流によって粉碎機から排出される粒子と粉碎領域に戻る粒子とが存在する。

粉碎実験により以下のことを明らかにした：(1) 本粉碎機の基本特性は、第二回転翼とケーシング

の隙間、回転翼の回転数、空気流量により決定され、付着が少なくなるこれらの最適領域が存在する。(2) 導入領域に流入する一次空気を冷却することで、常温の場合よりも付着が抑制されると共に粒度特性が細くなる。(3) 比誘電率の低いフッ素樹脂をケーシング材質に用いることで付着がなくなり、長時間の連続運転が可能である。(4) 本粉砕機の内部形状や気流の流れは粒子の付着抑制に有利に働き、本粉砕機は付着性原料の微粉砕に適している。(5) 付着性原料の連続微粉砕を可能にする要点は次のようにまとめられる: (i) 付着の支配要因を特定する。(ii) 粉砕温度を低くする。(iii) 粉砕部での滞留時間を短くする。(iv) 気流を整えて付着粒子を再飛散させる。(v) 壁面を平滑にし、適切な材質を選定する。

最後に、従来式では系外に排気されていた媒体ガスを再び粉砕部に戻し、媒体ガスを循環させる閉回路システムを開発した。この閉回路システムによって微粉砕された焙煎コーヒー粉末について香氣成分を測定分析し、香氣成分の散逸抑制に対する効果を検証した結果、閉回路システムでは、ピリジン、ピラジン、ピロールといったコーヒーのロースト香に関与する成分の散逸が抑制されることが判明した。香氣成分の絶対量は、粉砕温度によっても変化し得ることも明らかになった。この閉回路システムは、媒体ガスに窒素などの活性度の低いガスを用いることにより、粒子の酸化の防止や粉塵爆発の防止を図ることが可能である。

以上を要するに、本論文は食品工業、化学工業等の産業分野から要望がありながら数々の困難のために実用化がなされていなかった乾式の気流式粉砕機について、その内部流れの数値流体力学シミュレーションおよび可視化実験により粉砕機構を解明すると共に、成分の異なる付着性原料に対する本粉砕機の適用性を明らかにしたものである。これらの成果は、気流式粉砕機の開発・設計の技術を向上させたものであり、信頼性・有用性に優れており、機械工学・工業のに大きく貢献するものである。よって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。