

称号及び氏名	博士（工学） 竹内 寛久
学位授与の日付	平成 25 年 3 月 31 日
論文名	Numerical Modeling of Particle Breakage in Dry Impact Pulverizer (乾式衝撃式粉砕機における粒子破壊現象の数値モデリング)
論文審査委員	主査 綿野 哲 副査 足立 元明 副査 岩田 政司

論文要旨

粉砕操作は固体物質の粒子径を減少させて、その反応性を高めることや、多成分固体物質を均一に混合することなどの目的のために各種工業プロセスにおいて広く利用されている重要な単位操作である。粉砕プロセスによって得られる原料や中間体の粉砕物は、その粒度分布が最終製品の機能や特性に大きな影響を及ぼすことから、粉砕物の粒度分布を厳密に管理することが強く求められている。そのためには、粉砕プロセスで生じる現象を詳細に理解し、粉砕プロセスを制御・最適化する必要がある。

近年、粉体プロセスを理解するための手法として数値シミュレーションが注目されている。数値シミュレーションでは、実際に観察する事が困難な各種粉体プロセス内部の流体流れや粒子個々の運動挙動を再現することが可能である。しかしながら、これまで粉砕プロセスの数値シミュレーションについては十分に検討されておらず、粒子同士や粒子と粉砕室壁面との衝突頻度や衝突速度などの情報から粉砕現象を間接的に理解するだけであった。この原因として、現状の数値シミュレーション手法では粉砕プロセス内部における粒子の破壊現象を詳細に計算できないことが挙げられる。すなわち、粒子がどのような外力を受けた時にどのように破壊されるのかという現象をモデル化し、それらを個々の粒子運動の数値シミュレーションに組み込むことが非常に困難であるからである。したがって、粉砕プロセスを詳細に理解し、利用目的に応じた粉砕物を精度良く得るためには、粒子運動挙動だけでなく、粒子破壊現象を考慮した数値シミュレーション手法を開発することが必要である。

本研究では以上の背景のもと、単一粒子の破壊現象をモデル化するとともに、そのモデルと個々の粒子運動を数値シミュレーションすることで得られた粒子衝突速度や粒子径などの情報をカップリングし、粉砕プロセスにおける粒子群全体の運動挙動と粉砕現象

を同時に数値シミュレーションする手法の開発を目的としている。本論文はその研究成果をまとめたものであり、以下に示す5章から成り立っている。

第I章では、本研究の背景および本研究と関連の深い既往の研究について概観し、本研究の目的と本論文の構成を示した。

第II章では、乾式衝撃式粉砕機における流体および粒子運動挙動の数値解析を行った。第II章第1節では、乾式衝撃式粉砕機における流体および粒子運動挙動を、粒子分散相モデル(Discrete Phase Method: DPM)および数値流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)を組み合わせた粒子運動モデル(DPM-CFD カップリングモデル)を用いて数値解析した。数値解析から得られた流体圧力および粒子運動挙動は、流体圧力の測定結果および高速度ビデオカメラを用いて可視化した粒子運動挙動と良好に一致した。さらに、数値計算結果に基づき粉砕室内における粒子の衝突現象を解析したところ、流体によって加速された粒子が粉砕室の外周壁面に高速で衝突すること、および、粒子径の減少にもなって粒子衝突頻度および粒子衝突速度が減少することが判明した。以上の結果、提案した粒子運動モデルの妥当性および有用性を確認した。

第II章第2節では、前節で提案した数値解析手法を用いて、乾式衝撃式粉砕機の形状が粒子衝突頻度および粒子衝突速度に及ぼす影響を解析した。ここでは特に、ローターに付随したハンマーの本数、およびハンマー先端と粉砕室外周壁面との距離(クリアランス)について検討を行った。数値解析結果から、ハンマー本数を増加させると粉砕室内部の流体速度が増加し、それにより粒子と粉砕室外周壁面との衝突速度が増加することを明らかにした。また、ローター形状を変化させた場合における、粒子衝突速度および粒子衝突頻度から算出した粒子衝突エネルギーと粉砕実験から得られた結果を比較したところ、数値解析から算出した粒子衝突エネルギーと粉砕実験から得られた粉砕物の中位径の間には良好な相関関係が成り立つことが明らかとなった。これにより、数値解析を用いることで粉砕機の形状が粉砕物の粒子径に及ぼす影響を精度良く予測することが可能となった。

第III章では、単一粒子の破壊現象をモデル化し、衝撃式粉砕機における粒子群全体の粉砕現象を数値シミュレーションする手法を提案した。

単一粒子の破壊現象を、粒子強度、粒子衝突時に粒子が受ける応力、さらに粒子破壊後に得られる破片粒子径分布の3つの要素を用いてモデリングした。ここで提案した単一粒子の破壊モデルを、第II章で用いた数値解析手法とカップリングさせることで乾式衝撃式粉砕機における粒子群全体の運動挙動と粉砕現象を同時に数値シミュレーションすることを試みた。ここで、粒子強度は Griffith の理論から決定し、粒子内部に存在するクラックの長さ分布が対数正規分布に従うと仮定した。なお、本粒子強度モデルは粒子圧縮破壊実験によって得られた結果とよく一致することを確認している。さらに、粒子衝突時に粒子が受ける衝突応力は Hertz の理論を基にして粒子衝突速度の関数として表現した。粒子が壁面と衝突した際に、粒子強度が衝突応力よりも大きい場合には粒子は破壊されず、弾性反発させた。一方、衝突応力が粒子強度よりも大きい場合には、粒子は破壊され、複数の破片粒子へと置き換えた。この時、破片粒子の数、およびその粒子径は粒子衝突速度の関数であるパラメータを含んだ破壊関数を基に決定した。破壊関数のパラメータは粒子の衝突破壊実験によって得られた結果から決定した。これら一連の単一粒子の破壊モデルを粒子運動の数値シミュレーション手法とカップリングさせた結果、粉砕時間の進行にともなって粒子数が増加するとともに、粒子径が減少する様子をシミュレーションすることに成功した。さらに、粉砕時間の進行にともなって粒子径が十分に減少すると粒子強度が大きくなり、粒子破壊が発生する頻度が極端に減少した。

このことから、実際の粉碎現象に見られる粉碎限界を数値計算結果がよく表現していることが確認された。なお、本数値シミュレーション結果から得られた粉碎物の粒度分布は、同様の条件で行なった粉碎実験によって得られた粉碎物の粒度分布とよく一致したことから、本計算手法の妥当性を確認できた。さらに、粒子は粉碎室内部へと投入された直後に破壊され、その後粒子径を減少させながら粉碎室外周に沿って破壊されることを明らかにした。以上より、粒子が粉碎室内部でいつ、どのようにして破壊されるのかという現象を詳細に理解し、粉碎プロセス全体で粉碎現象が進行してゆく様子を正確に解析することが可能となった。

第 IV 章では、乾式衝撃式粉碎機の粉碎物粒子径を自動制御するシステムの開発を試みた。

乾式衝撃式粉碎機によって得られた粉碎物の一部を連続的にサンプリングし、それらをレーザー回折・散乱式粒度分布測定装置に空気輸送することで、粉碎物の粒度分布をオンラインで測定可能なシステムを試作した。このオンライン測定システムによって測定された粒子径は、原料の種類や粒子径に依らず、実際に粉碎実験を行なって得られた粉碎物の粒子径とよく一致した。このことから、試作したオンライン測定システムの測定精度の妥当性を確認した。次に、ファジィ理論および粉碎機の動特性を考慮した 25 個の IF-THEN ルールから構成される制御アルゴリズムを提案した。このアルゴリズムにオンライン測定結果を入力することで最適な粉碎機の操作量を算出した。操作量には、これまでの数値計算から粉碎物の粒子径に大きな影響を及ぼすことが明らかとなっているローター回転速度を用いた。この制御アルゴリズムから随時算出される操作量を乾式衝撃式粉碎機にフィードバックすることで、粉碎物の粒子径を自動制御したところ、粉碎物の粒子径は瞬時に目標値に到達し、その後、目標値を維持したまま粉碎操作が行われていることを確認した。また、本システムは、異なる原料粉体を用いた場合でも、同様の制御性能が得られる事を確認した。このことから、目的とする粒子径をもつ粉碎物を連続的かつ安定的に調製することに成功した。さらに、外乱として原料粉体の供給速度を大きく変化させた場合でも、この外乱を自動的に検出し、適切な操作量を粉碎機にフィードバックすることで、外乱の影響を最小限にとどめ、粉碎物の粒子径を一定に保つことが可能であることを示した。

第 V 章では、本論文の各章の研究によって得られた成果を結論としてまとめた。

審査結果の要旨

本論文は、単一粒子の破壊現象をモデル化するとともに、そのモデルと個々の粒子運動を数値シミュレーションすることで得られた粒子衝突速度や粒子径などの情報をカップリングし、粉砕プロセスにおける粒子群全体の運動挙動と粉砕現象を同時に数値シミュレーションする手法の開発について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 乾式衝撃式粉砕機における流体および粒子運動挙動を、粒子分散相モデル(Discrete Phase Method: DPM)および数値流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)を組み合わせた粒子運動モデル(DPM-CFD カップリングモデル)を用いて数値解析した。その結果、数値解析から得られた流体圧力および粒子運動挙動は、流体圧力の測定結果および高速度ビデオカメラを用いて可視化した粒子運動挙動と良好に一致した。さらに、粉砕機の形状が粉砕物の粒子径に及ぼす影響を精度良く予測することが可能であることを示唆した。
- (2) 単一粒子の破壊現象を、粒子強度、粒子衝突時に粒子が受ける応力、さらに粒子破壊後に得られる破片粒子径分布の3つの要素を用いてモデリングした。さらに、本モデルを、前述の粒子運動モデルとカップリングさせることで乾式衝撃式粉砕機における粒子群全体の運動挙動と粉砕現象を同時に数値シミュレーションしたところ、粉砕時間の進行にともない粒子数が増加し、粒子径が減少する挙動を詳細に再現することに成功した。さらに、数値シミュレーションによって得られた粉砕物の粒度分布が、粉砕実験の結果と良く一致したことから、本計算手法の妥当性を確認した。
- (3) 乾式衝撃式粉砕機によって得られた粉砕物の一部を連続的にサンプリングし、それらをレーザー回折・散乱式粒度分布測定装置に空気輸送することで、粉砕物の粒度分布をオンラインで測定可能なシステムを開発した。本システムによって測定された粒子径は、原料の種類や粒子径によらず実験結果と良く一致したことから、本測定システムの高い測定精度を確認した。次に、ファジィ理論および粉砕機の動特性を考慮した25個のIF-THENルールから構成される制御アルゴリズムにより粉砕物の粒子径を自動制御したところ、異なる原料粉体を用いた場合でも、目的とする粒子径をもつ粉砕物を連続的かつ安定的に調製することに成功した。

以上の諸成果は、粉砕プロセスの数値シミュレーションと粒子破壊現象に関する重要な知見を与えており、本分野における学術・産業上の発展に大きく貢献するものである。また、申請者が今後自立して研究活動を行う上で必要とされる能力と学識が備わっていることを証したものである。学位論文審査委員は、本論文の審査の結果から、博士(工学)の学位を授与することを適当と認める。