

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 30 日現在

機関番号：24403

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656474

研究課題名(和文)音速領域での超高速乾式粉碎への挑戦

研究課題名(英文)Dry impact milling at sonic speed region

研究代表者

綿野 哲(WATANO, Satoru)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40240535

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、音速領域での粉碎を可能とする超高速乾式粉碎機を開発した。種々の運転条件下で音速領域での乾式粉碎を行ったところ、粉碎物の粒子径を数ミクロンレベルにまで微細化することに成功し、通常の乾式粉碎での粉碎限界を遙かに超える粉碎性能を実現できた。さらに、粉碎機内での粉碎挙動をコンピュータシミュレーションにより解析し、粉碎メカニズムを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Development of a dry impact milling which could operate at sonic speed region was developed. It was found that micronization of particle down to single micron meter size at sonic speed region could be achieve which was imposable by the conventional dry impact milling. The milling mechanism was also analyzed by a numerical simulation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：プロセス工学・化工物性移動操作単位操作

キーワード：乾式粉碎 音速

1. 研究開始当初の背景

粉砕法は、あらゆる産業で使用される最も基本かつ重要な単位操作である。粉砕の目的は、原料やその中間体に機械的な外力を加え、目的とする大きさにまで破壊する方法である。最近では、単に粒子径を減少させるだけでなく、原料の結晶形を変化させて溶解度を改善したり、表面物性を制御するなど、高機能性材料を創製するために使用されるようになってきた。

粉砕法は、大別して、乾式法と湿式法に分類できる。乾式法は、解砕翼などの回転により、気相中で原料に機械的な衝撃力を与え粉砕する衝撃式粉砕法（ハンマーミル・ピンミルなど）と、圧縮空気により加速した原料同士を衝突させ粉砕するジェットミルが存在する。一方、湿式法（ボールミル、ロッドミルなど）は、粉砕容器に原料と水などの溶媒を同時に加え、液相中で原料を粉砕する方法である。湿式法は、乾式法に比べ、より小さな粒子径への粉砕が可能であるが、粉体材料を取り出す際に、粉砕物と溶媒の分離、乾燥、凝集塊の解砕などの工程が必要となる。また、粉砕工程中で微細な粉砕物を得たとしても、乾燥工程で粉砕物が凝集するなどの問題が生じる。したがって、設備のシンプルさ、粉砕後に後工程を必要としないなどの点から、乾式法の利用が増加している。しかしながら、一般的に乾式法では下限粒子径が、湿式法と比べ約1オーダー程度大きくなる。ジェットミルは、粉砕下限粒子径が数ミクロン程度であるが、処理量が少なく、また、大量の気体を必要とするなど、実用的には課題が多い。また、大量処理が可能な衝撃式粉砕法（乾式）では、湿式法に比べて粉砕下限径が大きく、世界中に現存する如何なる装置をもってしても10数ミクロンが限界である。

我々はこれまで、実験、高速ビデオによる可視化実験、コンピュータシミュレーションなどを駆使し、衝撃式粉砕法で原料粉体が粉砕される現象を詳細に検討してきた。一般的には、解砕翼先端速度（周速）が100m/sが限界であるが、これを150m/s程度にまで増加させると、これまでの粉砕下限径を超えた微細な粉砕が可能であること、さらに、従来までの乾式混合機では不可能である100ppm程度の微量な顔料の均一分散が可能となることなど、これまでになかった新しい知見を発見した。以上の背景を踏まえると、解砕翼先端速度をさらに増加させ、音速領域を超える領域での粉砕が可能になると、更なる粉砕効果が得られるのではないかと期待できる。

2. 研究の目的

粉砕法は、あらゆる産業で使用される重要な単位操作である。プロセスの簡便さから、乾式の粉砕法が多用されるが、10~20ミク

ロンに粉砕限界があり、それ以下のサイズには粉砕が困難であった。本申請では、解砕翼先端速度が音速を超える領域での乾式粉砕に挑戦する。さらに、粉砕現象を、実験、コンピュータシミュレーション等によって詳細に解析し、亜音速~音速領域での粒子衝突・破壊現象を科学的に解明することを目的とする。

3. 研究の方法

解砕翼先端速度を音速領域の350m/sまで増加させ、亜音速~音速領域での粉砕実験にチャレンジする。粉砕には、炭酸カルシウムを使用した。これらの粉体材料を用いて、亜音速から音速領域での超高速衝撃式粉砕実験を実施した。粉砕操作によって得られた粉砕物の評価は、レーザー回折式粒度分布測定装置による粒度分布、粉末X線による結晶構造解析、走査型電子顕微鏡を用いた外観観察などにより行った。

さらに、亜音速~音速領域での衝突・破壊現象を科学的に検証するため、コンピュータシミュレーションを用いた数値解析を行った。超高速粉砕機内の粒子の挙動は、分散相モデル（Discrete Phase Model : DPM）を用いて解析し、粒子の速度分布、軌跡、衝突頻度などを算出するとともに、粒子の衝突現象を解析した。さらに、粒子の運動挙動に加え、流体挙動の解析も行った。粉砕室内部の流体挙動は、数値流体力学（Computational Fluid Dynamics : CFD）により数値計算を行った。粉砕機内部の流体運動、速度分布などを解析し、亜音速から音速領域にかけて、流体の挙動が粉砕現象に及ぼす影響を解析した。さらに、粉砕現象の科学的解明に加え、粉砕機構造の最適化も行った。特に、粉砕容器の形状、解砕翼の形状・枚数・クリアランス、ミキシングアームの形状・回転速度が粉砕実験結果に及ぼす影響を調べるとともに、3次元CADで作成した粉砕容器、解砕翼、ミキシングアームのデータをDPMモデルに適用し、粉砕機構造が粒子・流体の運動挙動に及ぼす影響を明らかにした。得られた結果に基づき、実験、数値計算の双方から、最適な粉砕機構造を決定した。

4. 研究成果

本研究で試作した超高速粉砕機の概略を図1に示す。装置の粉砕室は、高速回転するローター、粉砕室に取り付けられた凹凸形状を有するステーター、分級に用いられるスクリーンにより構成されており、高速回転時の発熱対策として、粉砕室の外周壁を水冷式で冷却している。本装置では、粉体試料はスクリーフィーダーにより粉砕室側面から連続的に供給され、高速回転するローターとス

ターとの相互作用により粉砕が進行する。そして、分級に用いられるスクリーンを通過した粒子は製品として連続的に回収され、通過しなかった粒子は再び粉砕室を循環し粉砕される。以上の機構により、本装置では連続的に粉砕物を得ることができる。

本装置は、超高速回転を実現するために高周波モーターを採用した。これによりローター回転速度は最高で 655 rps まで設定可能であり、このときのローター先端速度は 350 m/s である。また、粉砕試料の供給速度はスクリーフィーダーによって制御可能である。

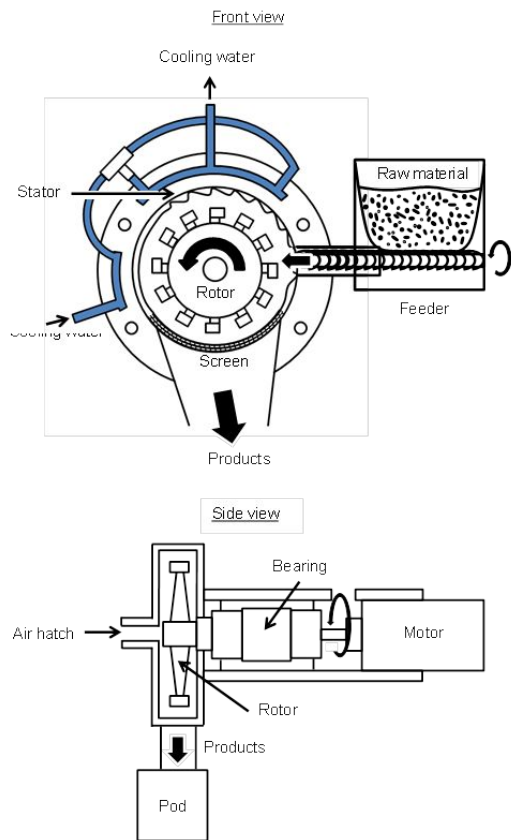


図 1 試作した乾式粉砕機の概略図

実験には、粉体試料として炭酸カルシウム（平均径：263 μm ）を使用した。実験では、355 μm （42 メッシュ）の篩で予め篩過した試料を用いた。また、粉砕原料の粒子径の違いが粉砕物粒子径に与える影響を検討するため、従来型のハンマーミルを用いて供給速度 30 g/min、ローター先端速度 100 m/s、粉砕時間 10 min、スクリーンの目開き 0.7 mm の運転条件で粉砕処理した炭酸カルシウム（平均径：22 μm ）を用いた。2 つの試料の粒度分布（体積基準）を図 2 に示す。試料は、水分による影響を取り除くため、333 K で 24 時間以上乾燥させたものを用いた。

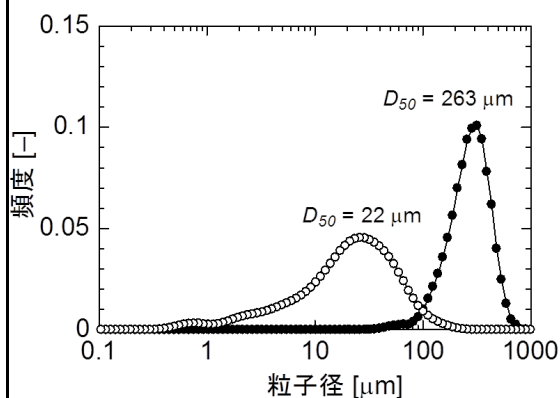


図 2 原料粉体の粒度分布

粒子径の異なる 2 種類の原料粉体を用いて乾式粉砕を行った。図 3 にローター先端速度と粉砕物の幾何平均径の関係を示す。粉砕物の粒度分布測定はレーザー回折式粒度分布測定装置（乾式）を用いて行った。また、粉砕原料の供給速度は 15 g/min とした。図より、ローター先端速度 100 m/s（従来型粉砕機の最大速度）においては、原料粒子径が大きい程、粉砕物の幾何平均径も大きくなる結果が得られた。しかしながら、試作した粉砕機で達成された超高速回転領域（ローター先端速度 250 m/s 以上）においては、原料粒子径が大幅に違うにもかかわらず、得られた粉砕物の幾何平均径はほぼ等しくなった。これは、ローター先端速度 250 m/s 以上の超高速回転領域では、粉砕性能が十分に大きいため、粉砕原料の粒子径によらず高い粉砕性能を発揮できることを示唆している。

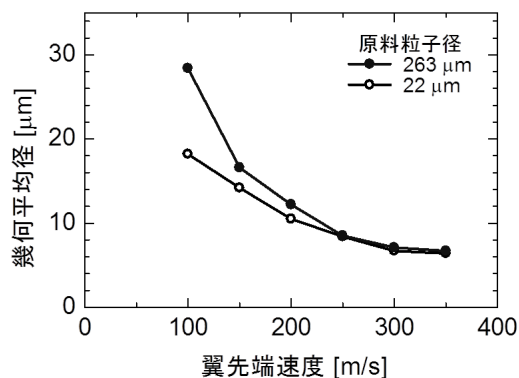


図 3 粉砕物の幾何平均径と翼先端速度の関係

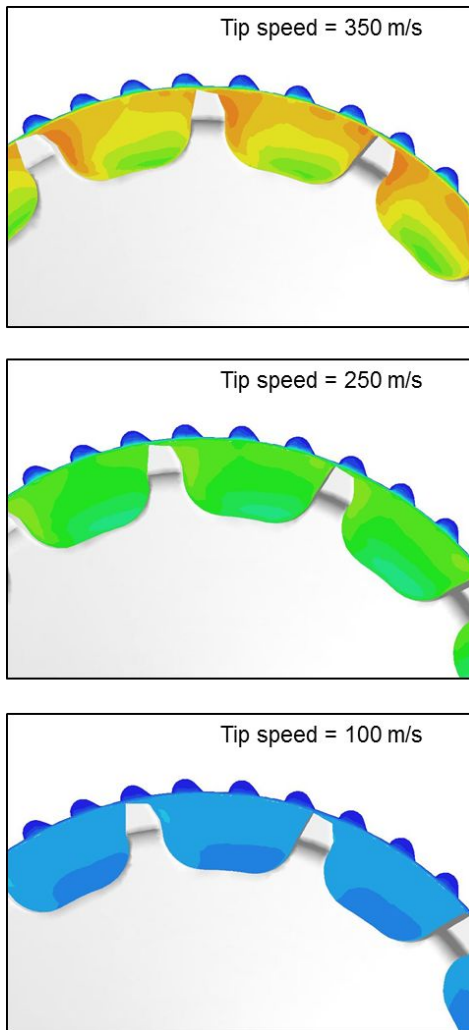
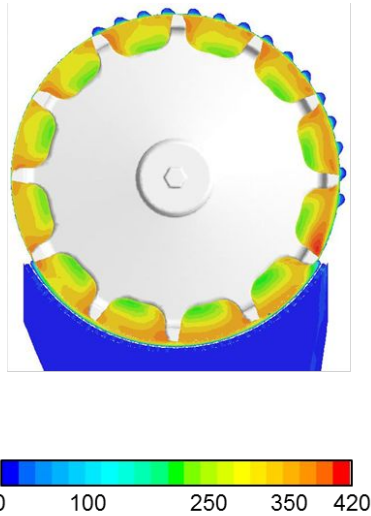


図 4 CFD 解析により得られた粉砕室内の流体速度分布

図 4 に、異なるローター先端速度における粉砕室内流体の速度分布を示す。ローター先端速度の増加に伴い、粉砕室内流体の速度は増加しており、特にハンマーの後部領域における流体速度が高くなっていることが確認できる。また、流体速度は、実際の翼先端速度よりも若干速くなることが判明した。

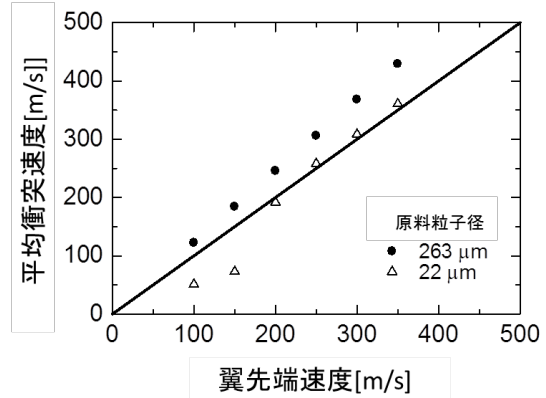


図 5 翼先端速度と平均衝突速度

図 5 に異なる原料粒子径におけるローター先端速度と粒子の衝突速度の関係を示す。粒子径 263 μm における衝突速度結果に着目すると、粒子の衝突速度はローター先端速度より速い速度で衝突していることが確認できる。粉砕室内の圧力分布を調べてみると、ローター先端とステーター凹部において強い圧力勾配が生じており、この圧力勾配により粒子が加速されるためであると考えられる。また、粒子衝突速度のローター先端速度からの増分は、ローター先端速度の増加に伴い、増加していることがわかった。これは、ローター先端とステーター凹部において生じる圧力勾配が、ローター先端速度の増加に伴い、増加するからであると考えられる。次に、粒子径 22 μm における衝突速度結果に着目すると、粒子の衝突速度は、粒子径 263 μm における衝突速度より小さいことがわかった。これは、粒子径の減少に伴い、粒子が受ける流体抗力が減少するためであると考えられる。

従って、超高速回転領域では、粒子衝突速度が飛躍的に大きくなるため粉砕性能が向上したと考えられる。また、粒子径が減少すると、衝突速度が減少するため、粉砕しにくくなるものと推察できる。

なお、数値解析および実験の双方から超高速衝撃式粉砕機の形状が粒子および流体の運動挙動などに及ぼす影響を解析したところ、最適なハンマー形状、ハンマー枚数、ライニング形状を決定することができた。

以上の結果、本研究では超高速ローターを有する新規な乾式衝撃式粉砕機を開発し、実験及び数値シミュレーションの両面から開発した粉砕機の性能を評価し、以下の知見を得た。

- 1) 粉砕実験より、超高速回転領域では原料粒子の供給速度及び供給粒子径によらず極めて高い粉砕性能を有していることが判明した。また、試作した超高速乾式粉砕機は、通常の衝撃式乾式粉砕では到達が困難なシングルミクロン（数ミクロン）までの粉砕を実現した。
- 2) 高速粉砕機内の粒子の挙動を分散相モデル（Discrete Phase Model：DPM）を用いて、また、流体挙動を数値流体力学（Computational Fluid Dynamics：CFD）によりそれぞれ数値解析を行った結果、超高速領域での粉砕挙動を明らかにすることができた。数値シミュレーションの結果より、超高速回転領域では、粒子のステータ壁面に対する衝突回数ではなく、一回当たりの粒子衝突エネルギーに起因して粉砕性能が向上したことがわかった。
- 3) 音速領域の粉砕では、従来の乾式粉砕機の粉砕性能を遙かに超える粉砕性能が得られることを明らかにした。

5．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計1件）

川口貴士, 仲村英也, 菅裕之, 綿野 哲, 浅井直親, "数値シミュレーションによる超高速乾式衝撃式粉砕機の解析および性能評価", 化学工学会第79年会, 講演要旨集 CD-ROM #SA1P23 (岐阜, 2014年3月18日)

6．研究組織

(1) 研究代表者

綿野 哲 (WATANO, Satoru)
大阪府立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：40240535