

## 今世紀に進展した粉体処理技術の紹介 The Introduction of Powder Processing Machines Advanced in the 21st Century

猪ノ木 雅裕  
Masahiro INOKI

ホソカワミクロン(株) 粉砕工学研究所所長  
Director, Powder Technology Research Institute, Hosokawa Micron Corporation

### Abstract

We have been developing a lot of new powder technologies with the goal of realizing the corporate vision of “Forming of Mountain Range of Powder Technologies”, since the foundation of our research institute in 1958. Recently, our new machines were launched every year, in order to obtain the high added value and improve the quality of the final products.

In this paper, we introduce the principle, structure and experimental data on the powder processing machines for fine grinding, flash drying, nanoparticle compositing and wet sieving, which were advanced in the 21<sup>st</sup> century.

### 1. はじめに

弊社の粉体工学研究所が1958年に設立されて以来、基本理念である「粉体技術連峰の形成（粉体技術を高い峰々とし、ノウハウや周辺技術等を裾野に配した雄大な連峰の形成）」の実現を目指して、これまで粉砕、分級、乾燥、混合、造粒、供給・排出、集塵、測定など様々な粉体処理装置について研究開発を重ねてきた。特に近年においては、粉体処理の生産性・経済性・安全性の向上はもちろんのこと、最終製品の品質向上と高付加価値化がなお一層強く求められていることから、それらを実現することのできる高性能な粉

体処理装置の追求に力を注ぎ、毎年、新製品・新技術を世に送り出してきた。

ここでは、過去15年間に弊社が開発・商品化した粉体処理装置の中から、表1に示す微粉砕、气流乾燥、ナノ粒子複合化、湿式篩測定のための装置について、それぞれの構造、特長、実験データなどを紹介する。さらに、粉体処理の単位操作の中でも関心の高いサブミクロン領域の超微粉砕について、最近開発した乾式媒体攪拌ミルの基本性能と解析結果を述べることにより、今世紀以降に進展した粉体処理技術の概要を紹介する。

表1 市場からの要求と当社粉体処理装置の進展

Table 1 Progress of powder processing machines derived from market demand.

分類	2000年以前	市場からの要求	2001年以降
	装置名		装置名
微粉砕	ACMパルペライザ	省エネルギー、耐摩耗、低騒音、清掃性向上	ACMパルペライザH型、HC型
气流乾燥	マイクロドライヤ	機内付着防止、高エネルギー効率	ドライマイスタ
ナノ粒子複合化	メカノフュージョン	緻密表面処理、精密分散、冷却効率アップ	ノビルタ
湿式篩測定	マイクロウォシーブ	強凝集性対応、短時間測定	ヴィブレット

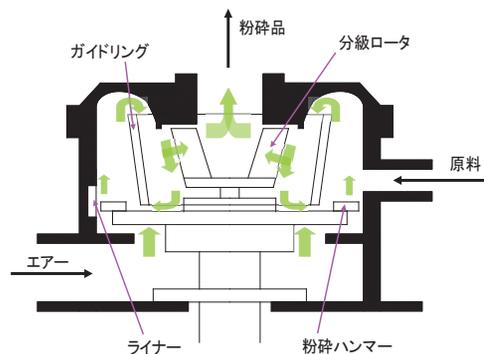


図1 ACM パルベライザの基本構造  
Fig. 1 Basic structure of ACM Pulverizer

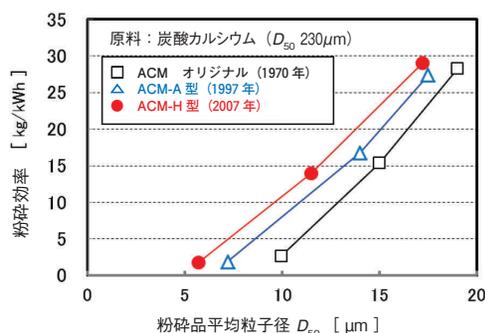


図2 ACM パルベライザの性能の変遷  
Fig. 2 Transition of grinding performance of ACM Pulverizer

## 2. 粉体処理装置の進展

### 2-1. 微粉碎装置

ACM パルベライザは、数十マイクロン以下の微粉碎を目的とした世界的にスタンダードな分級機内蔵型衝撃式粉碎機であり、装置内部は図1のように粉碎と分級を機能的かつ効率的に作用させる構造となっている。原料は、周速 100 m/s 以上で回転する粉碎ハンマーと周囲のライナーとの間で衝撃作用を受けて粉碎され、さらに高速回転する分級ロータによる遠心力と吸引される粒子の作用力とのバランスによって分級作用を受け、所望する微粒子だけが分級ロータを通過し、粉碎品としてバグフィルタから連続的に回収される。本粉碎装置は、過去 40 年以上に亘りその時代のニーズに応じて、粉碎ハンマーを中心に幾度となく改良されており、その変遷について重質炭酸カルシウムを原料にしたときの粉碎品平均粒子径と粉碎効率の関係で表すと図2のようになる。

その中でも、2007 年に開発した“ACM パルベライザ H 型<sup>1)</sup>”は、粉碎ハンマーとライナーの形状最適化と高周速化により、オリジナル型に比べて 10 マイクロン以下の微細化が可能となり、2 倍以上の粉碎効率の向上がみられる。長年の課題であった騒音対策についても、本体を二重ケーシング構造にすることにより、従来機の 100 dB から 85 dB まで大きく低減することに成功し、防音室などを設置することなく作業者に優しい粉碎機となっている。さらに、粉碎ロータ、ガイドリング、ケーシングの機内部品を軽量化し、人手で簡単に分解組立できる設計がなされており、色替えの頻繁な多品種生産に対しても、機内清掃作業が極めて容易に行える。

2010 年には耐摩耗の要望に応え、粉接部の部品全



図3 ACM パルベライザ HC 型  
Fig. 3 ACM Pulverizer HC-type

てがモノブロックのオールセラミックス製（ジルコニア、窒化珪素、アルミナなど）である“ACM パルベライザ HC 型”（図3）を開発した。リチウムイオン電池の原料である炭酸リチウムを粉碎した結果において、粉碎品中の鉄分コンタミネーションがほぼゼロであることを実証している<sup>2)</sup>。

このように省エネルギー、耐摩耗、低騒音、分解清掃性などの面で格段に優れた性能を持つ ACM パルベライザ H 型は、微粉碎の最新装置として様々な分野で導入され、数多くの実績を残している。

### 2-2. 気流乾燥装置

気流乾燥とは、熱気流中に湿潤材料を分散させ、熱風と並流に送りながら瞬間的に乾燥品を得る方式であるが、当社では単なる乾燥だけでなく粉碎・分級の機能を持ったマイクロドライヤ（図4）を 1959 年から販売開始した<sup>3)</sup>。高い熱容量係数ととれるため装置本

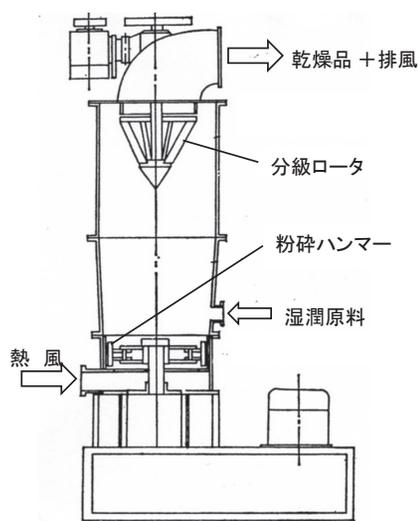


図4 ミクロンドライヤの構造  
Fig. 4 Structure of Micron Dryer

体がコンパクトとなり、乾燥品の粒子径調整も容易にできることから、国内だけで数百台の納入実績を残したが、その一方で、高付着性材料に対する機内付着の防止や、エネルギー効率をさらに上げたいという根強い要求も存在した。

そこで、粉碎・分級・乾燥の3操作を1台で処理できるミクロンドライヤの基本思想を受け継ぎながら、粉碎力を格段に向上させた“ドライマイスタ”を2000年に開発し<sup>4)</sup>、さらにエネルギー効率を大幅にアップさせた“ドライマイスタH型”を2013年に開発した<sup>5)</sup>。ここでは、最新型のドライマイスタH型を紹介する。

本装置は堅型円筒状の形をしており、その内部構造を図5に示す。本体下部には、周速100 m/sを超える粉碎ロータが回転しており、フィード口から供給された湿潤原料は、強力な粉碎・分散作用を受けて微小な粒子となり、それと同時に下部より流入してくる熱気流と激しく接触することによって瞬間的に熱交換し、乾粉と蒸気とに分離される。本体上部には、多数のブレードを有する分級ロータが回転しており、目標粒子径、目標含水率に達した粒子は気流と共に回転ブレードの間を通過して、捕集機にて回収され製品となる。一方、目標とする粒子径や含水率に到達していない粒子は、再び本体下部の粉碎部に戻され、要求される性状となるまで粉碎部と分級部の間で循環する。製品粒子径および製品含水率の調整は、主にこの分級ロータの回転数によって行われる。

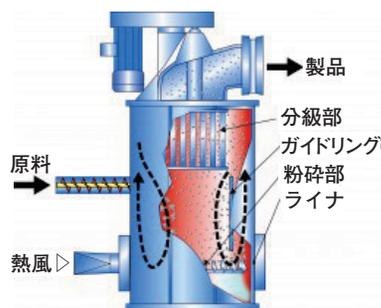


図5 ドライマイスタH型の構造  
Fig. 5 Structure of Drymeister H type

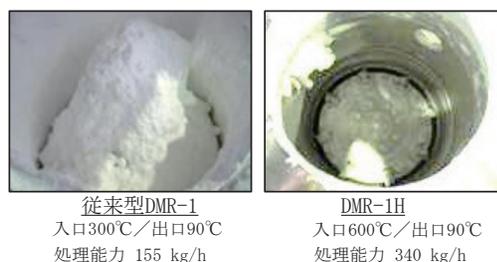


図6 機内付着の比較（原料：軽質炭酸カルシウム）  
Fig. 6 Comparison of sticking state inside the dryers (Raw material : precipitated calcium carbonate)

従来型からの主な改良点は、入口熱風温度の高温化とライナー表面の昇温である。従来機の入口熱風温度上限値400℃を、粉碎軸受部の特殊構造により600℃まで上げることが可能になり、エネルギー効率を50～70%向上させることができた。その結果、同一風量でも1.5倍以上の処理能力を得ることができ、大幅な省エネルギー・省スペースを実現した。さらに、ライナー表面を入口熱風で直接的に昇温することにより、長年の課題であったライナー上の付着現象が劇的に解消され、本装置の適用範囲の拡大に繋がっている。付着防止効果の一例として、強付着性原料である軽質炭酸カルシウム（ペースト状）に対して、従来のドライマイスタとH型のそれぞれで乾燥した時の機内付着状況を図6に示す。

本装置には、オプションで粉碎部材質を超鋼やセラミックス製とする耐磨耗仕様も装備されており、電池、電子、食品、化成品、鉱物など幅広い産業分野に適用できる乾燥装置となっている。

### 2-3. 機械的ナノ粒子複合化装置

ナノ粒子は、バルク状態とは異なった電気特性、磁

気特性、光学特性などの様々な物理的・化学的特性が発現することは周知のことである。その反面、比表面積の増大と共に粒子表面が活性化して凝集性が強くなるため、単一粒子に分散することが困難になり、物質によっては反応や粒成長などを起こし、ナノ粒子の機能が思うように得られないことが多い。機械的ナノ粒子複合化装置は、超微粒子同士の精密分散処理や、母粒子の表面にナノ粒子を均一分散させた被覆型複合粒子を生成することができ、ナノ粒子本来の機能を発現させることが大きな目的である。

弊社は、1980年代からこの機械的粒子複合化技術の開発に取り組み、乾式で多量の処理が行なえるメカノフュージョン(図7)を商品化し<sup>6) 7)</sup>、化粧品や二次電池材料など多くの分野で実用機を販売した。しかしながら、ナノ粒子のより一層の精密分散や消費エネルギーの削減など、材料加工に対する要求が年々厳しくなり、メカノフュージョンよりもさらに高性能な粒子複合化装置が強く望まれていたのも事実であった。そこで、長年にわたる粒子複合化技術を基に、ナノ粒子を効率良く複合化できる装置を開発したのが、以下に紹介する“ノビルタ”である<sup>8) 9)</sup>。

ノビルタは水平円筒状の容器内で、特殊な形状の攪拌翼が、30 m/s以上の周速で回転しており、衝撃・圧縮・せん断の力が粒子個々に均一に作用するように設計されている。このロータ形状と配列が、ナノ粒子を短時間のうちに均質に複合化できるノウハウとなっており、上部から投入された原料は、適切な処理時間(数分から長くても30分程度)の後、下部中央の排出口からほぼ全量が一気に排出される。また、本体ケーシングは水冷ジャケット構造であり、高いエネルギーを加えても品温の上昇を抑制でき、トナーのような低融点材料に対しても機内融着の懸念はほとんどない。図8に、有効容量100リッター型機の外観を示す。

本装置によるナノ粒子複合化のエネルギー効率を検証した結果を図9に示す。この図は、ケイ砂(平均径28 $\mu\text{m}$ )と酸化チタン(平均径15nm)を原料にして、ノビルタとメカノフュージョンで処理を行い、その比較結果をBET比表面積と比消費エネルギーの関係で示したものである。複合化の進行に伴って処理品の比表面積が減少しており、ノビルタ処理品は、ケイ砂単体の比表面積0.9 $\text{m}^2/\text{g}$ 、すなわち究極の複合品近くまで到達していることがわかる。また、エネルギー効率という点においても、ノビルタの圧倒的な優位性が示されている。

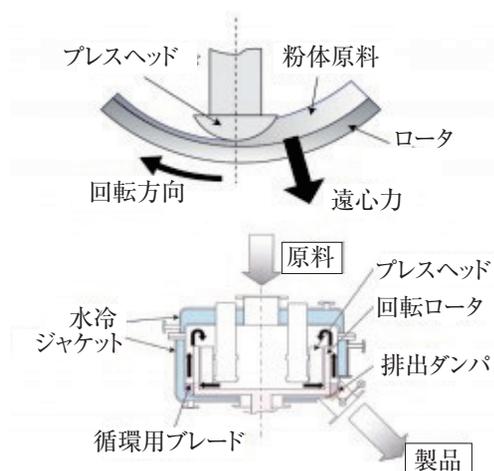


図7 メカノフュージョンの構造  
Fig. 7 Structure of Mechanofusion

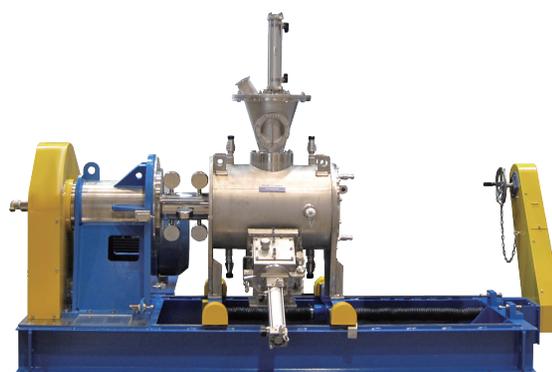


図8 ノビルタ(型式:NOB-700)  
Fig. 8 Nobilta (Model: NOB-700)

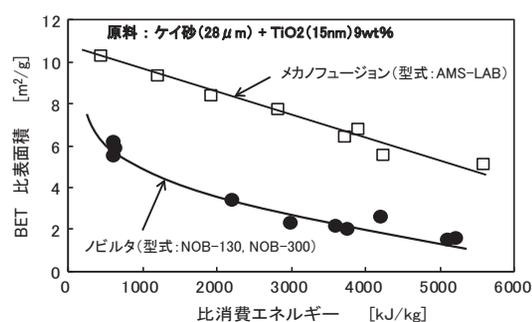


図9 ノビルタとメカノフュージョンの粒子複合化性能比較  
Fig. 9 Comparison of Nobilta and Mechanofusion on nanoparticle composite speed

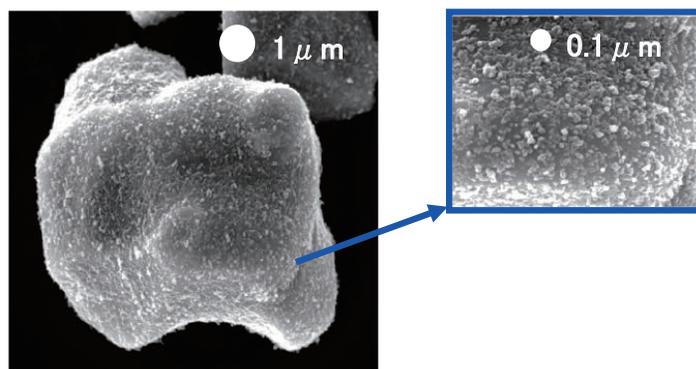


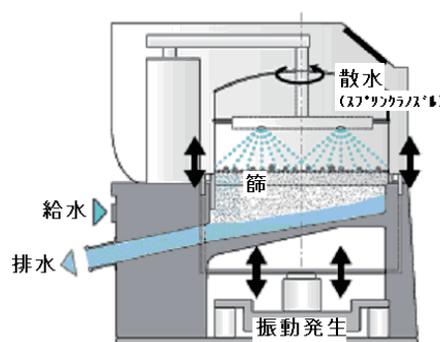
図10 コバルト酸リチウム粒子（平均径10 $\mu\text{m}$ ）とカーボンナノ粒子（平均径50nm）の複合化処理品  
Fig. 10 Compounding with lithium cobaltate (average size 10 $\mu\text{m}$ ) and carbon (average size 50 nm)



図11 ミクロンウォシーブ  
Fig. 11 Micron Wasieve



図12 ヴィブレットの外観と構造  
Fig. 12 Structure of Viblette



ナノ粒子複合化処理の一例として、二次電池の正極活物質であるコバルト酸リチウムとカーボンナノ粒子の処理品を図10に示す。カーボンナノ粒子が凝集することなく、コバルト酸リチウム粒子の表面に均一に分散しているため、導電性ネットワーク構造の形成により電池の内部抵抗が減少し、電池出力が大きく向上することが実証されている<sup>10)</sup>。

以上のように、ノビルタはバインダを使用することなくナノ粒子複合品を簡単に作製することができ、既存プロセスへの組み込みも容易なことから、ナノ粒子を取り扱う産業分野で多くの実績を残している。

#### 2-4. 湿式篩分測定機

粒子径測定の一手法である湿式での篩分け法は、大昔から品質管理に利用されていたが、水道水を篩の上部から散水しながらサンプルを筆でこすったり、篩枠を叩いて衝撃を与えるなど手間のかかる作業であり、

安定した篩分けができず再現性が良くないという課題があった。

1972年に開発したミクロンウォシーブ（図11）は、回転するスプリングラから水を噴射させながら、空気を媒体にして網面を振動させるユニークな湿式篩分機であり、乾式篩分け法には適さない静電気を帯びた粒子や油分を持つ粒子などを対象に長年使用されてきた。しかしながら、近年の品質管理においては、短い測定時間で作業員間の誤差が生じないことはもちろんのこと、強凝集性粒子から微量の粗大粒子を検証したいなどの厳しい要求が求められ、2013年に新たに開発したのが、図12に示した“ヴィブレット”である<sup>11)</sup>。

本機は、散水用スプリングラ部、篩分部、振動発生部で構成され、振動部に所定の篩（外径 $\phi$ 200mm）を置いてカバーを閉めると、散水ノズルが所定の位置にセットされるシンプルな構造である。サンプル分散

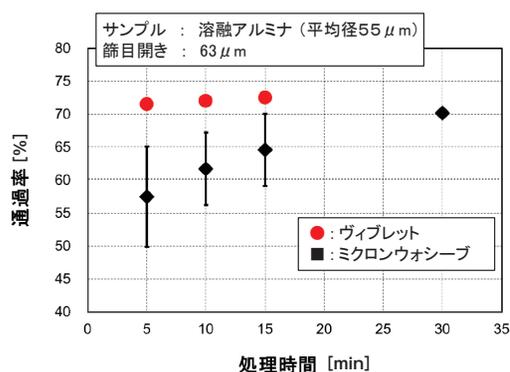


図 13 ヴィブレットとミクロンウォシーブの性能比較図

Fig. 13 Comparison of Viblette and Micron Wasieve on pass efficiency

用の水 (3ℓ/min 以上) は、その水圧で回転する篩上部に設置したスプリンクラからサンプル全面に万遍なく噴霧されるため、場所によるバラツキなしに篩分けできる。さらに、電磁方式で篩面を直接、強力に振動させ液膜の形成を防止すると共にサンプルの凝集塊を解砕することができ、効率的な湿式篩分けを実現している。散水ノズルの回転数、処理時間、振動・散水のタイミングは、本体操作パネル上で簡単に設定・操作でき、水量とスプリンクラの回転数を独立で制御することも可能である。

従来のミクロンウォシーブとの構造の違いは、散水パターンと振動発生方法であり、熔融アルミナ (平均径 55 μm) を目開き 63 μm の篩で測定した結果を図 13 に示す<sup>12)</sup>。ヴィブレットは、処理時間 5 分で篩通過率 72 % であるのに対して、ミクロンウォシーブは 30 分でも到達しておらず、各処理時間でのバラツキの点でも大きな差異となっている。このように、従来の 1/3 程度の処理時間で再現性も確保できる本機器には、スラリーの連続処理などのオプション装備も充実しており、多くのユーザーから湿式篩の適用範囲が大きく広がったとの高い評価を得ている。

### 3. 乾式超微粉碎機 “プルビス”

粉碎は、比表面積の増加、分散性・流動性の向上、焼結品の均一性・成形性の改善など様々な目的に用いられており、近年、エレクトロニクス分野を中心に新素材が飛躍的に進歩するに伴い、原材料となる粉体自体が益々細かい方へ移行し、超微粉碎の需要が一層

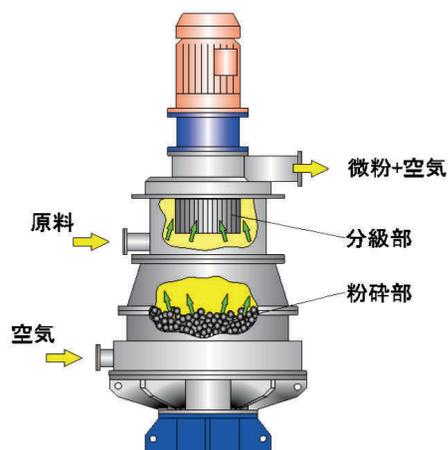


図 14 プルビスの構造

Fig. 14 Structure of Pulvis

高まっている。

こうしたニーズに応えるべく、乾式法で連続的にサブミクロン粒子を生産できる装置を目標に開発を進め、2009年に商品化したのが分級機内蔵型乾式媒体攪拌ミル“プルビス”である<sup>13) 14)</sup>。サブミクロン領域までの粉碎を省エネルギーで達成でき、金属コンタミレスの特長も有する本装置について、その基本性能と解析結果を紹介する。

#### 3-1. 構造

プルビスの構造を図 14 に示す。本装置は、直径数ミリ程度の媒体ボール (主にジルコニアボール) を強制的に攪拌する粉碎部を装置下部に持ち、上部より投入された原料が媒体ボールと共に攪拌される際に強力な衝撃力、圧縮力、せん断力、摩砕力の作用を受けて微細化される。底部から均一に流入する気流により、粉碎品は装置上部の高速回転型分級部に運ばれ、所望する超微粉子だけが気流といっしょに機外に排出され、バグフィルタ下から粉碎製品として回収される。媒体ボールの運動が激しいため、粉碎部の材質はセラミック製 (攪拌ピン: ジルコニア, ケーシング: アルミナ) を標準装備としており、分級ロータの材質も原料の摩耗性に応じて各種のオールセラミック製が使用される。

#### 3-2. 最適運転条件

媒体ボール径や粉碎回転速度など粉碎部の最適な運転条件を見つけるために、アルミナの原料を用いて実験した結果を図 15 と図 16 に示す。両図とも、横軸は

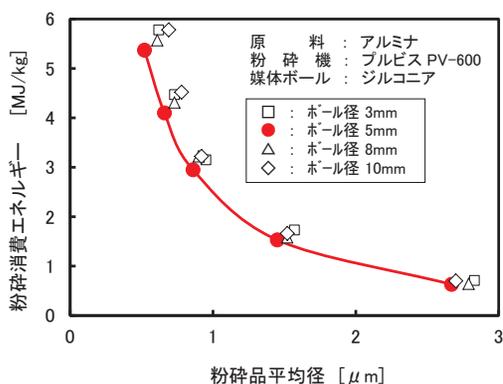


図 15 ボール径が粉砕消費エネルギーに及ぼす影響  
Fig. 15 Effect of media size on grinding consumption energy

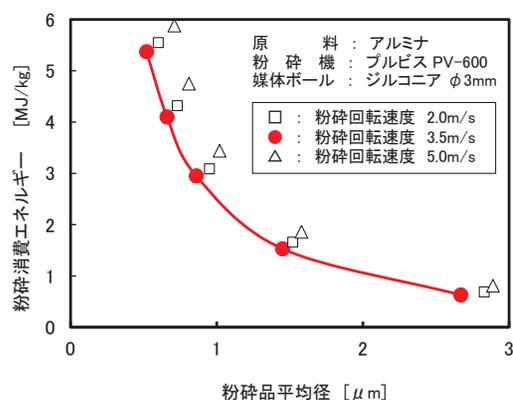


図 16 粉砕回転速度が粉砕消費エネルギーに及ぼす影響  
Fig. 16 Effect of rotor speed on grinding consumption energy

粉砕品の平均粒子径、縦軸は原料単位質量当たりの粉砕消費エネルギーを表し、ラインが下側にあるほどエネルギー効率が良好であることを意味する。

湿式の媒体攪拌型ミルは、小さいボール径ほど衝突頻度が高まり粉砕効率が上昇する傾向にあるが、乾式粉砕である本装置においては、図 15 の結果が示すように最適なボールサイズが存在する。これはボール個々にある程度の慣性力がないと凝集性の強い乾粉を分散・破壊できないからであり、本装置では型式の大小に関係なくジルコニアボールは直径 5 mm を標準的に使用している。

粉砕回転速度についても、図 16 のように最適点が存在する。回転速度が速すぎると、ボールの充填密度が下がるため衝突頻度が減少してしまい、逆に遅すぎるとボールの衝突力が弱まり十分な粉砕力が得られな

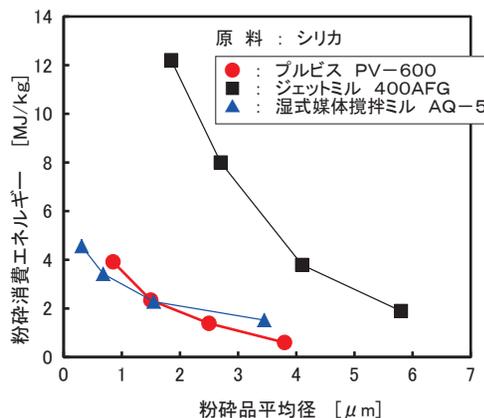


図 17 粉砕消費エネルギーの比較  
Fig. 17 Comparison of grinding consumption energy

いことになる。本装置では型式の大小およびボールサイズに関係なく、攪拌翼の先端で 4 m/s 前後を標準速度としている。

### 3-3. 粉砕消費エネルギー

数ミクロンオーダーまでの微粒子を乾式法で生産する場合には、噴射ノズルからの音速に近い高速エアで粉砕を行うジェットミルが広く使用されてきたが、コンプレッサーを動力源とするため、膨大なエネルギーを消費するという欠点があった。

プルビスは、従来のジェットミルと比較して 5 分の 1 以下の消費エネルギーで粉砕できることが、多くの実験結果により実証されており、その一例としてシリカを原料にしたときの流動層式ジェットミル (型式 400AFG)<sup>15)</sup> との比較データを図 17 に示す。この図より、ジェットミルでは困難なサブミクロン域の粉砕を極めて低い消費エネルギーで実現できていることがわかるが、これは媒体ボールの頻繁な衝突による効率的な粉砕機構と高性能な風力分級機構の組合せに起因している。粉砕機構の解析結果については後述する。

超微粉砕が効率的に行える湿式法と比較するため、同図中に湿式媒体攪拌ミル (アクマイザ、型式 AQ-5)<sup>16)</sup> の結果をプロットした。この図が示すようにサブミクロン域の微粉砕においては、確かに湿式媒体攪拌ミルの方が少ない粉砕エネルギーとなるが、後工程で乾燥処理が避けられない場合には、粉砕エネルギーと同等以上の乾燥エネルギーが必要となる。したがって、乾粉状態でサブミクロン粒子を得る場合には、乾式処理によるプルビスを選定する方が、プロセス全体の省エネルギーという点で優位となる場合があ

表 2 媒体ボール摩耗量の比較結果 (原料：珪石, 平均径 32 μm)

Table 2 Comparison result of media wear volume (Raw material : Silica D<sub>50</sub> = 32 μm)

使用粉碎機 (型式)	プルビス (PV-270)	アクマイザ (AQ-5)
φ5mmジルコニボール初期投入量 [g]	15000	10000
φ5mmジルコニボール摩耗量 [g]	0.49	0.33
乾粉基準での処理能力 [kg/h]	2.54	0.75
粉碎品平均径 [μm]	0.83	0.85
粉碎品単位質量当たりの媒体摩耗量 [ppm]	193	660

る。

### 3-4. 媒体ボールの摩耗

粉碎の原理上、媒体ボールの摩耗を避けることはできないが、乾式法の場合には乾粉がボール表面にコーティングされるため、湿式法と比較すると媒体の摩耗量は少ない傾向にある。粉碎品中に含まれる実際のコンタミネーションは、粉碎回転数などの運転条件よりも原料の摩耗特性によって大きく変化し、ジルコニア

ボール使用時に数 ppm から数百 ppm の幅がある。

一例として、摩耗性の強い珪石を原料にしてプルビス (型式 PV-270) と湿式媒体攪拌ミル (アクマイザ 型式 AQ-5) のそれぞれで粉碎を行い、処理前後のジルコニアボールの重量差から摩耗量を比較した結果を表 2 に示す。

### 3-5. 粉碎機構の解析

粉碎速度式については多くの理論的研究が行われているが、Epstein<sup>17)</sup> が統計的手法により確立した選択関数 S (x) (粒径 x が単位時間当たり破壊される確率密度分布) と破壊関数 B (x,y) (粒径 y の単一粒子が破壊した時のフルイ下粒度分布) の考え方を適用し、連続型粉碎機内の物質収支式を立てると次式が得られる<sup>18)</sup>。

$$F \frac{dQ_F(x)}{dx} - F \frac{dQ_P(x)}{dx} - W \cdot S(x) \frac{dQ_P(x)}{dx} + W \int_x^{x_{\max}} S(y) \cdot \frac{dQ_P(y)}{dy} \cdot \frac{dB(x,y)}{dx} dy = 0$$

x : 粒子径、Q<sub>F</sub>(x) : 原料のフルイ下累積粒度分布  
 Q<sub>P</sub>(x) : 粉碎品のフルイ下累積粒度分布  
 F : 原料供給速度、W : ミル内滞留量

先に示した図 17 のプルビスとジェットミルのシリカ粉碎実験データを用いて、上式により粉碎機構を解析した結果を図 18 と図 19 に示す。

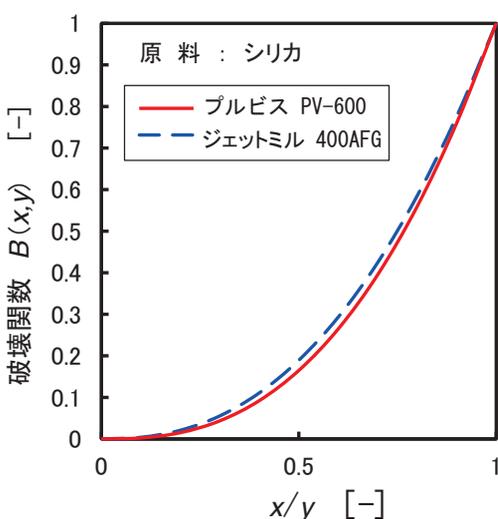


図 18 破壊関数の比較結果  
 Fig. 18 Comparison of breakage function

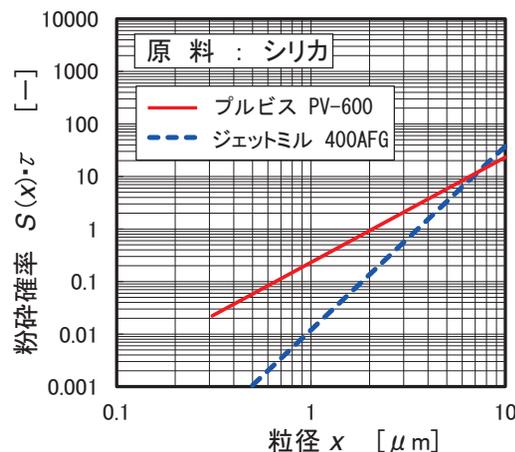


図 19 選択関数の比較結果  
 Fig. 19 Comparison of selection function

図18の破壊関数の比較結果において、両機種のラインに大きな違いが見られず、衝撃スピードを音速近くまで高めても、微粉の発生量はそれほど増加しないことがわかる。

一方の図19は、粒径 $x$ の粒子が粉砕機内での平均滞留時間 $\tau$ の間に粉砕される確率を表している。数ミクロン以下の微粒子の領域において、プルビスの粉砕確率の方が圧倒的に高い値を示しており、粒子径 $1\mu\text{m}$ で比較すると10倍以上の差異が見られる。これは、ジェットミルのような高速気流を使った粉砕機構の場合、粒子径が数ミクロン以下になると空気の粘性効果<sup>19)</sup>により、壁面衝突や粒子同士の衝突の頻度が極端に低下してしまうのに対して、プルビスの粉砕機構は、多数の媒体ボール接触面で確実に粉砕力を加えることができ、粒子径に大きく影響することなく粉砕が進行するためであると考えられる。

以上の結果より、超微粉砕を効率良く行うキーポイントは、単純に衝撃スピードを上げるのではなく、粒子の衝突頻度を如何に高めるかという点にあり、今後の乾

式超微粉砕機の開発、設計の方向性を示唆している。

#### 4. おわりに

本稿では、弊社が今世紀に開発した粉体装置の中から、代表的なものをいくつか紹介した。各分野の素材開発が急速に進歩する中で、そのシーズ・ニーズにしっかりと対応できているとは言い難いが、粉体技術の地道な進展に伴い、長年言われ続けてきた“粉は魔物”という神話的な言葉は、少しずつ影を潜めつつある。

ナノレベルまでの超微粉砕や粒子サイズと形状の同時制御処理など、ハイレベルの粉体装置・粉体処理プロセスの要求が今後益々加速していくに違いなく、弊社独自のコア技術の高度化・複雑化・緻密化を図りながら、顧客が望む新しい機能や価値を生み出す新技術を誕生させ、世界の粉体関連業界の発展に貢献したいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 吉川他, 粉砕, No.53, p67 (2010)
- 2) 千葉, 産業機械, No.10, p49 (2010)
- 3) 横山, 化学装置, p25, 1993年3月号
- 4) 猪ノ木, 化学装置, p33, 2002年6月号
- 5) ホソカワ製品ハンドブック, p320, ホソカワミクロン(株)(2013)
- 6) ホソカワミクロン(株)編, メカノフュージョン, 日刊工業新聞社(1988)
- 7) 粉砕, No.43, p88 (1999)
- 8) 猪ノ木, 産業機械, 650, p45 (2004)
- 9) 猪ノ木, 化学装置, p46, 2006年5月号
- 10) 門脇ら, 第36回技術討論会テキスト「電池の高性能化と粉体技術」, p70 (2001)
- 11) ホソカワ製品ハンドブック, p390, ホソカワミクロン(株)(2013)
- 12) 笹辺他, 湿式篩分け評価装置ヴィブレットの技術, p15, 粉体工学会第50回夏期シンポジウム講演要旨集(2014)
- 13) ホソカワ製品ハンドブック, p254, ホソカワミクロン(株)(2013)
- 14) 猪ノ木, 顔料, vol.57 No.1, p8 (2013)
- 15) ホソカワ製品ハンドブック, p238, ホソカワミクロン(株)(2013)
- 16) 猪ノ木, 化学工業, 化学工業社, Vol.41, p22 (1990)
- 17) Epstein, Ind. Eng., Chem., No.40, 2289 (1948)
- 18) 猪ノ木, 化学装置, p48, 1986年3月号
- 19) 田中, 粉体プロセス入門, 工学図書(株), p.210 (1981)