

メカノケミカル分野における高速遊星ミルのスケールアップ手法について

Scale up method of high-speed planetary mill for mechanochemical synthesis

水野良幸* 齋藤文良** 三尾 浩***

Yoshiyuki Mizuno, Fumio Saito,

Hiroshi Mio

ミル（粉碎機）が粉碎だけでなく反応機として、すなわちメカノケミカル効果による新素材の創製および/または高付加価値品のリサイクル、製造プロセスにおけるCO₂の削減・省エネルギーなど環境保全に貢献する装置として注目を集めている。当社は微粉碎および顕著なメカノケミカル効果を持つミルとして、高速遊星ミル「ハイジー®」についてはこれまでに約30台の販売実績があるが、すべて実験機および/または小型生産機であった。このたび、離散要素法によるコンピュータシミュレーションにもとづいて設計した75kWモータ搭載の大型遊星ミルを納入したので紹介する。

Mills have become widely known not only as grinding machines but also as reactors that can create new materials by mechanochemical synthesis, recycle valuable materials and help reduce CO₂ and save energy in the production process. Kurimoto has delivered about thirty high-speed planetary “KURIMOTO HIGH G” mills as experimental machines or flexible production machines because of their fine grinding and remarkable mechanochemical effect. These first mills were the foundation for delivering a large planetary mill with a 75kW motor that had been scaled up by computer simulation “DEM”.

1. はじめに

「すべての製品は粉から作られる」という言葉は多少の誇張があるが、粉碎が製造プロセスの主要要素技術であり、その重要性はほとんどすべての産業において使用されていることから言を俟たない。ところが最近、ミル（粉碎機）が粉碎だけでなく反応機として、すなわちメカノケミカル効果による新素材の創製および/または高付加価値品のリサイクル、製造プロセスにおけるCO₂の削減・省エネルギーなど環境保全に貢献する装置^{1)~5)}として注目を集めている。当社は微粉碎および顕著なメカノケミカル効果を持つミルとして、1987年に高速遊星ミル「ハイジー®」を上市し、これまでに約30台の販売実績がある。これらの大部分は実験機であり、生産機であっても11kW以下の小型機であった。大型遊星ミルが生産機として市場に受け入れられなかった主な理由は、①バッチ処理である、②構造が複雑で大型化できないの2点である。均質なメカノケミカル効果を付加するには大抵の場合、数十分以上の時間をかけてバッチ処理する必要があり、連続式ではこのような長時間にわたる均質な処理には向いていない。そこで、当社は、バッチ処理を自動的に連続して実施できる機構を遊星ミルに盛り込んだ。大型化に関しては機械メーカーとしての当社にとってさほど困難な課題ではなく、数年前にすでに大型化が成功していた。

このような条件下において、ユーザからメカノケミカル効果の確認実験依頼があり、当社実験機（BX382型、モータ11kW）によって期待以上の結果が得られて、75kWモータ搭載の大型遊星ミルを受注・納入すること

* 機械事業部 粉体システム技術部

** 東北大学多元物質科学研究所

*** (株)けいはんな

ができたので、以下に技術報告する。なお、本報告に関しては守秘義務により納入先・処理物・ミル詳細仕様などは記載できないので、予めご了解いただきたい。

2. 高速遊星ミルの構造と処理物のハンドリング

2.1. 高速遊星ミルの特長

- ①大きな遠心加速度のため小径ボールを使用でき、処理時間も最短
- ②自転が順方向または逆方向の可逆式…実験結果と後述のコンピュータ・シミュレーション解析（CS）により最適自転方向、自公転比を設定可能
- ③CSによりの確に大型化可能
- ④低振動・低騒音

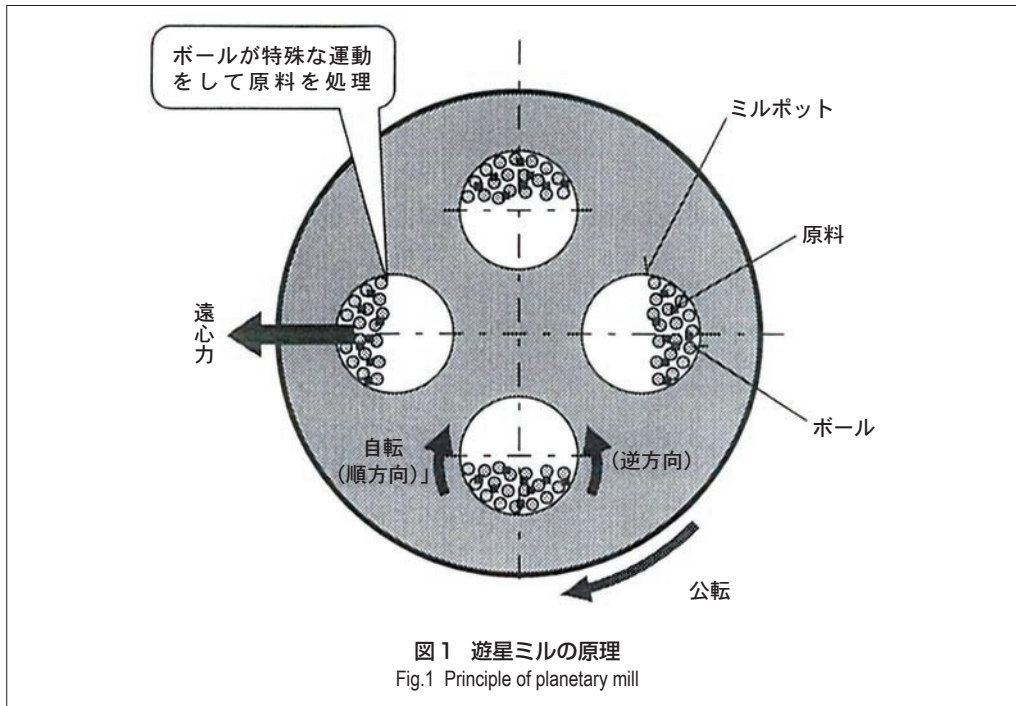
2.2 高速遊星ミルの構造

高速遊星ミルは、図1に示すとおり公転するミル公転体と順方向または逆方向に自転するミルポットで構成されている。ミルポットの中に粉碎媒体（小径ボール）と処理粉体を入れ、ミルポットを公転・自転運動すなわち遊星運動させることにより、ボールに大きな遠心加速度と特殊な運動を与えて粉体を処理する。ここで報告する大型ミルの自転方向は、実験結果にもとづきミル公転体と

表1 大型遊星ミルの主仕様

Table 1 Main specification of the large size mill

形 式	ハイジー BX764S
ポット容量	25 × 10 ³ cm ³
粉碎媒体 (小径ボール)	φ 5 mm
モータ	75kW

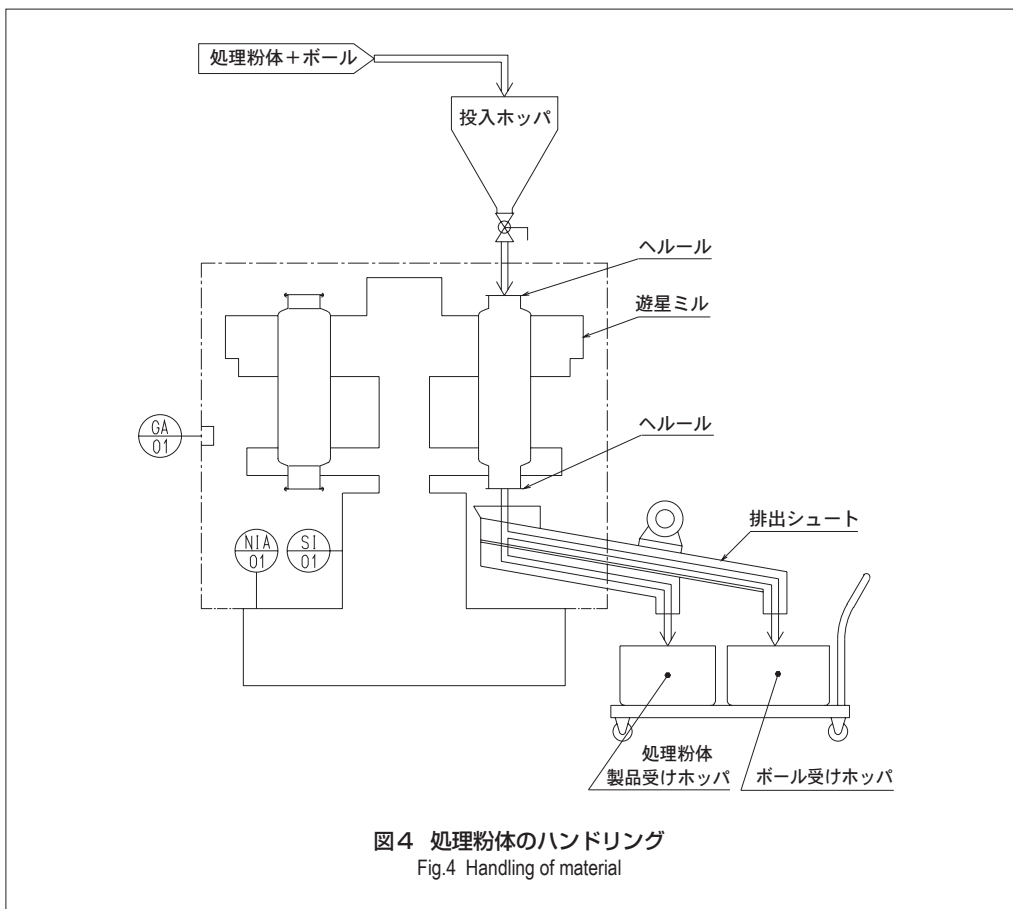
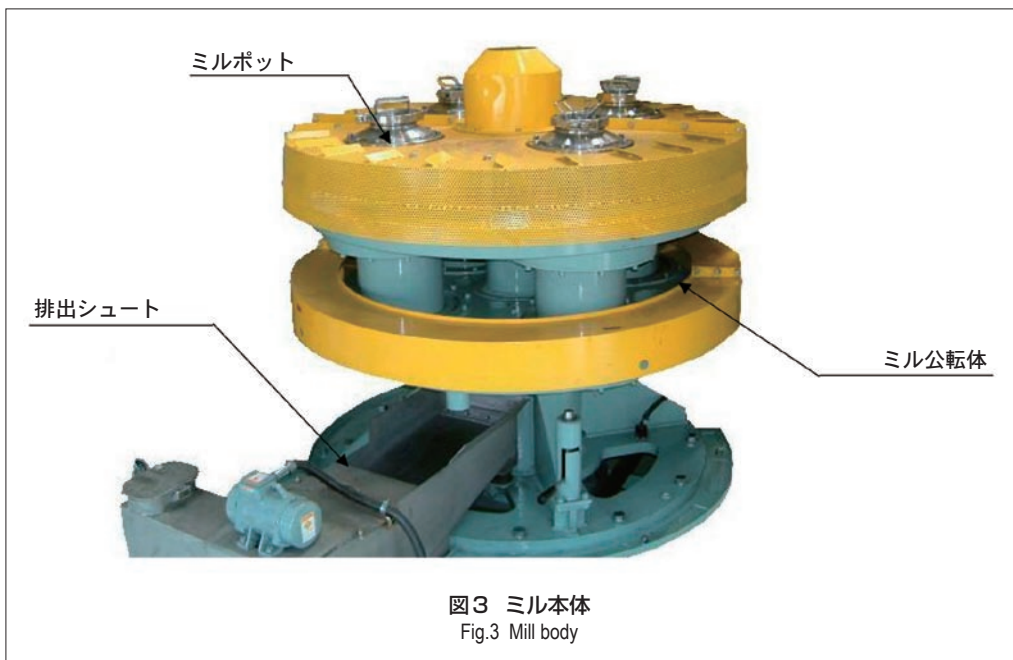


順方向とした。大型遊星ミルの外観を図2に、主仕様を表1に示す。

表1においてボールはφ5mmと小さなものを使用しているが、当社以外のミルでは一般的にφ数十mm以上を使用する。小さい直径のボールを使用すると単位体積当たりのボール個数が多くなり、ボール間で粉体を処理するチャンスが飛躍的に多くなる。たとえば直径が半分になるとボール個数は約8倍になるので、粉体を均質に処理することができる。直径が小さく1個当たりの重量は少なくなるが、大きな遠心加速度を与えることにより

小径ボールが持つエネルギーを、遠心加速度の小さい大径ボールと同程度にすることができるので、短時間で均質な処理が可能となる。これが遠心加速度を大きくする利点である。

ミル本体を図3に、処理粉体のハンドリングを図4に示す。図3において、ミル本体は公転体、4対のミルポットおよび、ポットから粉体とボールを取出し・回収する排出シュートで構成されている。図4に示すとおり粉体とボールはあらかじめ計量して、投入ホッパに貯留した後、ミルポット上部から充填される。ミルポット



ト蓋を全閉後、ミルを設定時間運転する。その後、ミルポット下部から粉体とボールを排出シュート経由で排出する。排出シュート内にはグリズリが設けられていて、グリズリ間隙寸法より小さい粉体と、大きいボールとに

ふるい分けられる。回収処理物は後工程へと搬送され、ボールは計量後、ニューフィードとともに再度ミルポットに充填される。

3. 遠心加速度、CS解析結果および実際の現象について

遊星ミルのボールに作用する最大遠心加速度 a_{max} は、次式⁶⁾で表されている。

$$a_{max} = \omega_1^2 \{ G + D(1 + R)^2 \} / 2 \quad (1)$$

- ここで、 ω_1 : 公転角速度(1/s)
- G : 公転直径(m)
- D : ミルポット内径(m)
- R : 公転自転のギア比(-)で、自公転方向が順方向か逆方向によってRの値が正または負である。

遊星ミル内のボール挙動のシミュレーション(CS)は、東北大学多元物質研究所・齋藤研究室で離散要素法⁷⁾を用いて、ミルポット内に処理物とボールが共存する条件下で行った。

表2に実験機(BX382)と大型機(BX764S)のCSによる衝突エネルギーの垂直・接線成分割合の計算結果を示す。自転方向は順方向とし、最大遠心加速度は式(1)により $150 \times 9.8 \text{m/s}^2$ とした。ボール材質はベアリング鋼のSUJとジルコニアの2種類である。なお、表2には、実測したエネルギー密度も併せて表記した。

実験機において比重の小さいジルコニアボールの衝突エネルギーはSUJの結果より小さくなったのは当然の結果であるが、衝突エネルギーの垂直成分と接線成分の割合は同一であった。これは、エネルギー値は異なるが、ボールが処理物に同方向で荷重を作用させていることを意味する。CSを利用することで、大型機と実験機の垂直と接線成分の比をほぼ同じにすることができるとともに、さらに図5および6に示すとおり垂直成分と接線成分の衝突エネルギー分布において、両ミルでのピーク値がほぼ一致していることが確認でき、大型化しても実験機で作製した処理サンプルとほぼ同一のものができると考えられる。

遠心加速度を同一にするとCSの結果のごとく、大型機では衝突エネルギーが大きくなる。エネルギー密度を実測すると同一の遠心加速度では大型機の方がエネルギー密度が大きくなり、CS結果と良く一致した。実際に、大型機では実験機の遠心加速度 $150 \times 9.8 \text{m/s}^2$ より小さくしても、実験機と同じ処理時間で同等の処理物を得ることができた。

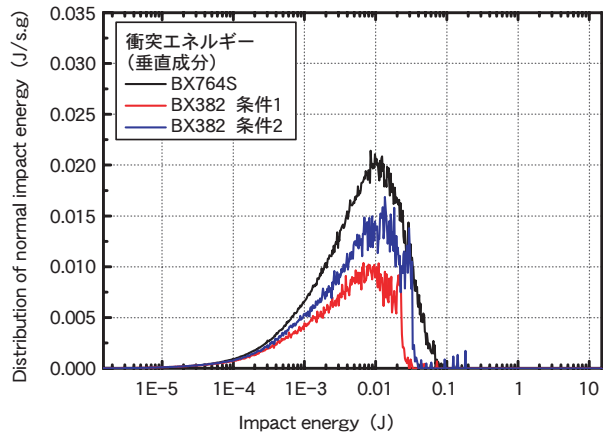


図5 衝突エネルギー分布(垂直成分)
Fig.5 Distribution of normal

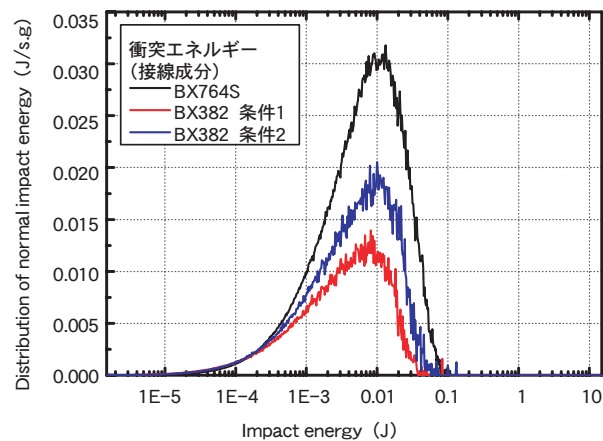


図6 衝突エネルギー分布(接線成分)
Fig.6 Distribution of tangential

表2 実験機と大型機のCS条件と結果

Table 2 Computer simulation result of the experimental mill and the large size mill

機械 サイズ	運転条件(CS条件)			CS結果				実測結果 エネルギー密度 (kW/h/リットル) ^{A)}
	自転 方向	遠心加速度 $\times 9.8(\text{m/s}^2)$	ボール 材質	ボール衝突エネルギー (J/s · g)				
				垂直成分V	接線成分T	V/(V+T)	T/(V+T)	
大型機 (BX764S)	順方向	150	SUJ	2.66 (1.4) ^{B)}	4.10 (1.6)	39%	61%	0.98 (1.5) ^{B)}
実験機 (BX382) (条件1)	同上	同上	ジル コニア	1.26 (0.67)	1.73 (0.68)	42%	58%	—
実験機 (BX382) (条件2)	同上	同上	SUJ	1.88 (1.0)	2.54 (1.0)	42%	58%	0.64 (1.0)

注) A) エネルギー密度=(負荷動力実測値-無負荷動力実測値)/ポット容積
B) 実験機(条件2)の数値を1.0にした場合の比

4. おわりに

前述のとおり、CSにより小型遊星ミルの実験結果から大型機の仕様決定を的確に行えることが確認でき、CSが今後のミル設計に非常に有効なツールであることが確認できた。メカノケミカル分野への遊星ミルの用途開発はますます増加する傾向にあるだけでなく、遊星ミルがナノ粒子の粉碎および分散も可能であることが最近分かってきたので、遊星ミルの用途開発が一層盛んになると期待している。今後とも皆様のご指導・ご鞭撻のほど、よろしく願います次第である。

参考文献

- 1) 田中泰光、張其武、齋藤文良：第40回夏季シンポジウム論文集、粉体工学会、p36-37(2004)
- 2) 伊藤貴裕、張其武、齋藤文良：第40回夏季シンポジウム論文集、粉体工学会、p42-43(2004)
- 3) 飯村健次、鈴木道隆、廣田満昭：第40回夏季シンポジウム論文集、粉体工学会、p44-45(2004)
- 4) 阿部修実、古池正史：第40回夏季シンポジウム論文集、粉体工学会、p46-47(2004)
- 5) 齋藤文良：第40回夏季シンポジウム論文集、粉体工学会、p52-53(2004)
- 6) 趙千秋、神保元二、金子貫太郎：栗本技報No.21、p24-29(1989)
- 7) 加納純也、三尾浩、齋藤文良：化学装置p50-54、2001年9月号

執筆者

水野良幸

Yoshiyuki Mizuno

昭和61年入社

粉碎機の設計、開発に従事



齋藤文良

Fumio Saito

工学博士

東北大学多元物質科学研究所副所長



三尾 浩

Hiroshi Mio

東北大学大学院工学研究科卒

工学博士

(株)けいはんな研究員

