

革新的素材を誕生させる 3Dボールミル

—ナガオシステム—

ジャーナリスト 乗松幸男

1方向に重力で押し付けず、浮いた状態で粉碎する

ナノ素材と大いに関連する製造装置がボールミルである。ボールミルとは粉碎機的一种で、微粒子素材をつくる際にも使われている。円筒形の容器に粉碎される材料と粉碎用ボールを入れて回転させ、材料を粉碎する。粉碎用ボールを小径にすることによって微細な粒子をつくる。

このボールミルは、一般には筒型の容器を1方向に回転させるが、容器を丸い球体にして、1方向ではなく縦と横の直交する2軸の方向に同時に回転させるのが3Dボールミルだ(図1)。従来のボールミルが2次元方向にのみ回転して材料を粉碎していたのに対し、3Dボールミルは3次元方向に回転力が加わる。

今回は多少専門的な説明が多くなってしまいが、物体は回転するほど姿勢が乱れにくくなる性質を持っている。回転している独楽を思い浮かべてもらうとわかるが、これをジャイロ効果と言う。そうした効果が、縦横2つの回転軸から得られることになる。

従来の円筒形のボールミルは、壁面の方向に材料が押し付けられるが、3Dボールミルでは一方向ではなく、丸い球体容器の中で材料もボールも浮いた状態になる。これによって、従来のボールミルよりも発熱がきわめて少なく、均一性が高い粒子を得られ、材料が押し付けられて凝縮してしまわないのが3Dボールミルの特色である。ナノレベルの微粉碎も可能である。

また、粉碎用ボールを容器に入れずに材料だけを入れればリアクター(反応装置)としてナノレベル微粒子の攪拌、混合、分散、乳化などに使える。3次元効果によって、有機物と無機物の混合や、粘度比重などが異なる材料を均一混合することができる。

こうした特色を持った粉碎混合装置3Dボールミル(リアクター)を独自に開発・製造し、主として研究開発機関などに納入しているのがナガオシステム(神奈川県川崎市麻生区、資本金1000万円、従業員5名)である。

同社を創業した長尾文喜は1946年生まれ。東北工業大学で電子工学を学び、マイクロモーターのメーカーなどで主として電子回路制御の仕事に携わった後、1994年ナガオシステムを設立。独立した。独自の制御装置を創りたかったと言う。

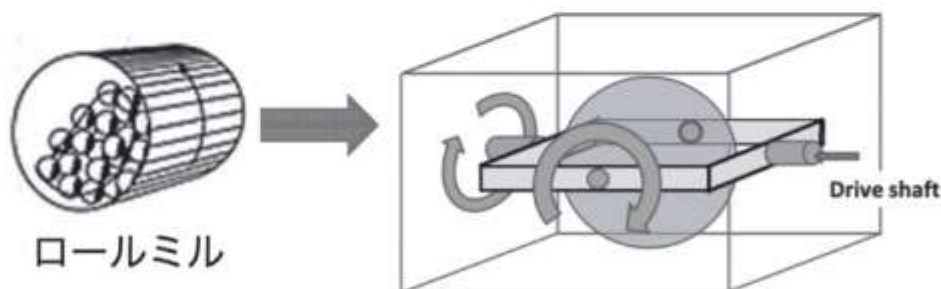


図1 縦と横の直交する2軸の方向に同時に回転させる

創業当初は理化学用検査機器を手がけた。例えば、検疫所用の成分分析機である。これは、野菜や肉を破碎して成分分析するものだ。あるいは、血液比重を調べる遠心分離器などを依頼されて製造した。

中でも、経営的に寄与したのはホモジナイザー（分散・乳化装置）である。乳製品や印刷インクなどの生産に使われる機械だ。メーカーからOEM生産を依頼されたため、安定した売上げを得られた。

傾斜型遊星ボールミルから、疑似無重力発生装置へ

2004年からは自社製品も手がけるようになっていく。それが傾斜型遊星ボールミルだが、この開発が後の3Dボールミルを生み出すきっかけとなった。

遊星ボールミルとは、筒型のボールミルを単純に回転させるのではなく、遊星歯車という複数の歯車を使って容器を自転させながら公転させる装置である（図2）。

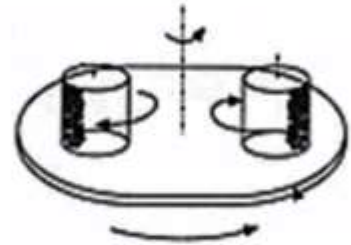


図2 自転させながら公転させる遊星歯車

遊園地にあるコーヒーカップ遊具の動きを考えると、わかりやすい。

コーヒーカップは、それ自体は自転するが、同時に大きな円盤に乗って大きく公転する運動をしている。このコーヒーカップ遊具に使われているのが遊星歯車である。

互いにかみ合う歯車のうち、大きな歯車の内側の小さな歯車が、自転しながら同時に、大きな歯車の軸を中心に公転する。小さな歯車の動きが、まるで太陽のまわりを惑星が回転するようなので遊星歯車と呼ばれる。

同社の遊星ボールミルは、一般のボールミルのように1方向のみに回転するのではなく、自転しつつ公転運動もするのだ。しかも傾斜角度を与えて容器を取り付けている。このため、異なる方向の加速度からの力が加わることになり、従来のボールミルを高速回転させたときに生じた素材表面の破損や凝縮が解消でき、短時間で大量の微粒子が得られた。

傾斜型遊星ボールミルは、電子材料、インク、塗料、カーボンナノチューブや光触媒などのナノ素材の製造に利用されている。この傾斜型遊星ボールミルを開発した当時、同社の理化学機器は産業技術総合研究所や物質・材料研究機構などの研究機関に納入されるようになっていた。それらの研究者から寄せられたのが、同社の遊星ボールミル技術はクリノスタットに活用できるのでは、というものだった。

クリノスタットとは、いわば疑似無重力発生装置である。植物や生物に対する重力の影響などを実験する際に使用される装置で、試料の容器を直交した2軸方向に回転させることによって重力ベクトルを相殺して、地上で疑似的な微小重力環境を発生させる。しかし従来のクリノスタットは大型の装置で高額だった。

長尾の技術によれば、もっと簡単な構造で容器を3次元的に回転させられる。考えたのは「ボールミルの回転軸をもう1つ加え、クリノスタットのように2方向の回転軸で球体の容器を回す」ことだった。要するに、小規模なクリノスタットをつくろうとしたのだ。

長尾は、当時考えていたことを振り返っている。

「疑似無重力装置の簡易なものができれば、小中学校の理科実験に使ってもらえるな、と思っていました。ちょうどそのころ、日本人初の女性宇宙飛行士の向井千秋さんがスペースシャトルで実験に使ったキュウリの種の子孫を小学校に配っていたんですね。それに触発されて、同じように子どもたちの科学の目を養うことに貢献できれば、と思って理科の実験室とか、科学雑誌の付録とかで使われることを考えながら開発していたのを記憶しています」

もちろん、それだけではなく研究開発の現場での用途も想定していた。粉碎用ボールミルの性能アッ

ブである。従来の筒型容器を1方向に回転させるボールミルでは、高速回転させると破碎する素材も破碎用ボールも容器壁面に遠心力で貼り付いてしまい、一定の回転数以上では破碎効果がなくなってしまうからだ。

2つの回転軸で丸い球状容器を回転させると、破碎素材にも破碎用ボールにも容器内で複雑な方向から重力がかかる。主として無機物の破碎に使えば、高効率の破碎が可能となる、と長尾は狙いを定めていた。

発熱が少ない粉碎、混合で 有機物と無機物の混合素材も

ところが、開発は一筋縄ではいかなかった。それまでの遊星ボールミルで傾斜角度が付いていた回転軸を、X軸とY軸の2方向に直交した軸で回転させねばならない。この点は、2枚の円盤で回転を伝える構造により直交軸の2方向回転を実現した。

回転速度も問題だった。従来のクリノスタットの回転速度は超低速で、1分間に10回程度。ボールミルよりはるかにゆっくり回さないといけない。回転数の制御技術がここで役に立った。何しろ長尾は、若いころからモーターを回し、ホモジナイザーを回し、ボールミルを回して、とにかく回転をコントロールし続けている。

最後の課題は容器の形状だった。

「やっぱり丸い球体がいいとわかったのですが、大きさによって内容物にかかる力が変わります。海に浮いているブイを使ってみたり、フラスコの丸い部分を使ってみたり、いろいろ試しました」(長尾)。

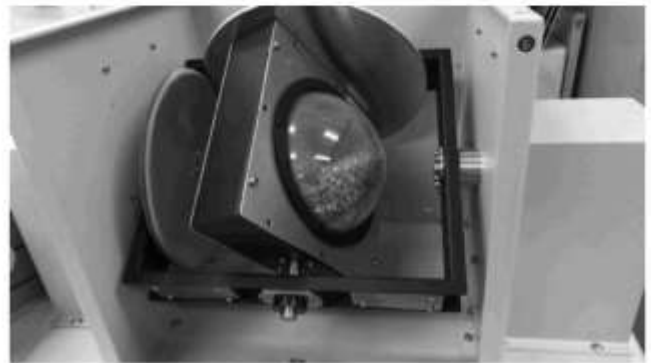


写真1 2リッター容器をモーター2台で二軸方向に回転

こうして誕生したのが3Dボールミル(写真1)である。2009年に商品化された。前述の経緯で説明したようにクリノスタットの一つとして開発したため、特許はクリノスタットとして取得しているが、クリノスタットよりも高速で回転させると粉碎ミルとして使える。回転数はコントロールボックスによって制御する(写真2)。

折しも、話題を集めていたのが「都市鉱山」だった。都市にある鉱山とは携帯電話のことである。廃棄された携帯電話からレアメタルを取り出せることが注目されるようになっていた。

その都市鉱山の発掘に3Dボールミルが打って付けだった。携帯電話を3Dボールミルに入れると10分ほどで粉碎できる。従来のボールミルと比べ格段に効率がよいのだ。

しかも、粉碎用ボールを入れなければ混合・分散機にもなるのである。こうしたことから、3Dボールミルは展示会な

どで注目を集めた。それによって、当初の想定以外の用途が判明してきた。幅広いユーザーが興味を示したのだ。

長尾が考えていたのは無機物が中



写真2 プログラム制御によって均一作業が可能



長尾文書社長

心だったが、有機物の粉碎や、有機物と無機物の混合にも適していることも判明した。2019年、3Dボールミル（リアクター）を活用した有機物と無機物の革新的素材の創製によって、同社は「かながわ産業Nabi大賞」を受賞している。

特に、従来のボールミルと比較して発熱量が桁違いに少ないメリットが大きかったからだ。医薬品、化粧品、化学メーカーや精密電子メーカーに納入されるようになった。

なお、3Dボールミルはプログラム制御によって作業を均一化し、自動的に作業内容を記録して検証可能にしている。さまざまな用途に関する共同研究も始まった。物質・材料研究機構、東京農工大学などをはじめとする公的研究機関のほか、自動車業界、電機業界、ガラス業界、化学品業界などの民間企業の研究機関とも開発が進んでいる。

わかりやすく言えば、重力の影響を受けない環境下での粉碎や混合によって、いままでつくれなかった素材ができるようになった、ということである。長尾によれば、「たとえば混合するのに、いままでの研究開発では乳鉢でつくっていたんですが、きわめて高性能の、熱が出ないで均一性の高い混合ができる乳鉢みたいなものです。いわば別次元の乳鉢から新しい素材が生まれるようになったわけです」としている。

民間企業との場合、ほとんどがNDA（機密保持契約）を結んでいる。このため技術的詳細は避けるが、用途は例えば二次電池（蓄電池）用のナノ素材、積層コンデンサ、常温製造アンモニア、水溶性フラーレン、異種金属の混合、特殊インクなどである。

3次元回転の生む新素材は？学術研究から産業化応用へ

3Dボールミルと競合する技術分野を持っているのは現在、粉碎機、混合機、分散機などを製造しているメーカーである。しかし、既存の粉碎機や混合機、分散機と比較すると、3Dボールミルは効率が高いうえに、熱の発生が極めて少ないことから、用途が広がり、潜在的マーケットは大きい。

同社の前期年商は7000万円。主として3Dボールミルなどの理化学研究用機器を研究機関に納入する売上げである。販売方法は、展示会や自社展示室で装置現物、および粉碎、混合の結果を電子顕微鏡などで見せながら直接販売する。販売先は7割が学術研究機関、3割が民間企業の研究セクションなどであり、売上げの主体は装置代金およびノウハウ提供料である。

3Dボールミルのような特異な機器の価格がどれくらいなのか、大いに興味があるところだが、残念ながら長尾によれば「価格は公表できません。ただし納入先が研究機関なので、アカデミック価格です」とのことだ。要するに、リーズナブルな価格であり、その代わりに論文に企業名が掲載されるなどのPR効果がある、ということであろう。

2020年、同社では6ℓのボール容器を備えた3Dボールミル（リアクター）の大型システムを完成させた。その狙いについて、長尾はこう言う。

「学術論文を書くためには小さな3Dボールミルでもいいのですが、産業レベルで使われるためには大容量化が必要です。今後は、粒度分布を安定化しつつ大型化していくことによって、生産ラインでも使える装置に持って行きたいと考えています」

すでに、製造を請け負ってもらう大手メーカーと共同開発を進めている。試験中の3Dボールミルは容量が8ℓで、容器を球体でない形状で種々研究している。球体容器とは重力方向が異なってくるため、さまざまな新素材を生む可能性もあるそうだ。

果たして非球体の容器がどんな新素材を生むのか。独創的な粉碎混合装置メーカーの今後は、未知の魅力を秘めている。

（敬称略）**N**