

伝導伝熱とマイクロ波加熱のハイブリッド型乾燥機の紹介

株式会社大川原製作所 杉本 隼人
Hayato SUGIMOTO

Key Words: 伝導伝熱、マイクロ波、ハイブリッド

1. はじめに

株大川原製作所は、乾燥技術を柱として食品、化学品、医薬品、各種素材などの製造分野から、汚泥の肥料化や飼料化を目的とするリサイクルなどの環境分野まで、幅広いお客様のニーズに合わせカスタマイズした装置を提供している。

近年では、多くの企業が、脱炭素・カーボンニュートラルの実現やSDGsの目標達成に向けた取り組みを進めている。当社においても省エネルギー、省資源、環境負荷低減、省人力化に貢献する製品の開発にも注力している。例えば、濃縮装置に蒸気圧縮型ヒートポンプを組み合わせた省エネルギーで高効率な「ヒートポンプフラッシュエバポ」を商品化している。運転条件によるが、本装置は濃縮液から蒸発する蒸気を圧縮して加熱源とすることで当社の従来装置に比べエネルギー消費量は約85%削減、CO₂排出量は約80%削減となる。

また、流動層乾燥機などの熱風を用いる装置では、ヒートポンプを組み合わせることで省エネルギー効果が見込める。例えば自然冷媒の水熱源熱風ヒートポンプは常温の水（通常は廃棄されている、30℃程度の未利用の低温熱源）から熱をくみ上げ、最大120℃の熱風を供給することが可能である。100℃の熱風を供給する条件では、蒸気を用いて熱交換する方法に比べエネルギー消費量、CO₂排出量を45%削減することも可能である。また、排出される冷却水を活用することでさらに省エネルギー効果が高くなる。本乾燥システムは「オーカワラ ハイブリッド乾燥システム®」と称しており、新規装置に限らず既設の熱風を用いる

乾燥装置にも適用可能であり、エアヒーターと組み合わせることで120℃以上の所定の温度まで昇温することも可能である。

2. 伝導伝熱とマイクロ波加熱のハイブリッド型乾燥装置

2-1 伝導伝熱乾燥¹⁾

伝導伝熱を利用した乾燥装置は各種熱源（蒸気、温水など）により加熱された伝熱板からの熱伝導により材料に熱が伝えられ、水分などの液体が蒸発する。乾燥工程前半は、材料表面付近から蒸発し、乾燥速度と材料品温が一定となる定率乾燥期間である。乾燥工程後半は、蒸発面が材料内部に後退することで、材料表面の温度が上昇し、乾燥速度が低下する減率乾燥期間となる。また減率乾燥期間の後半では材料内部の水分が不連続となり、材料内部で液体が蒸発し蒸気として材料内部を移動し、さらに材料の温度を上昇させながら内部へ熱が伝わるため蒸発に使われる熱は減少し、乾燥速度は急激に低下する。

当社では伝導伝熱方式の乾燥装置として容器本体が回転する「FV ドライヤー」や逆円錐型容器の内部にリボン状の攪拌翼を設けている「リボコーン」などをラインナップしている。いずれの装置も減圧下での運転が可能である。

「FV ドライヤー」は、コニカルドライヤーにろ過機能を付加し、1台でろ過、乾燥、洗浄、混合などを行える多機能な乾燥装置である。攪拌機能がないシンプルな内部構造で工程間の材料移送が不要となるなど、サニタリー性や汎用性が求められる

る医薬品、ファインケミカル製品の用途に適している装置である。写真-1に装置外観を示す。

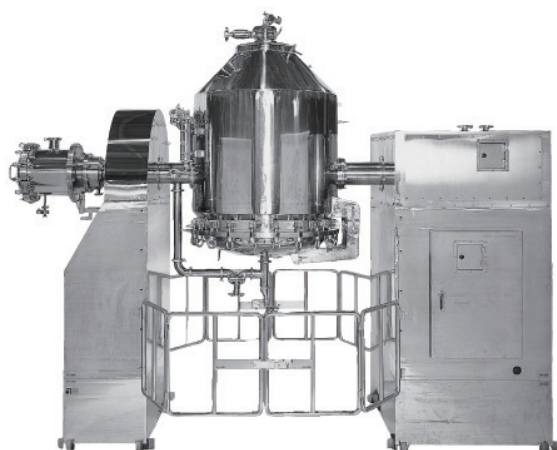


写真-1 FV ドライヤー外観

「リボコーン」は、粉体混合装置であり乾燥機能を付加することが可能である。装置内の粉体はリボンスクリューの回転により加熱された容器の壁面（伝熱面）に沿って持ち上げられ、上部に設置された渦流ブレーカと称するバッフル板にて中央部に落下させ、再び壁面に沿って持ち上げられる。この循環流によって粉体を効率よく混合、乾燥できる装置である。図-1に装置の概略を示す。

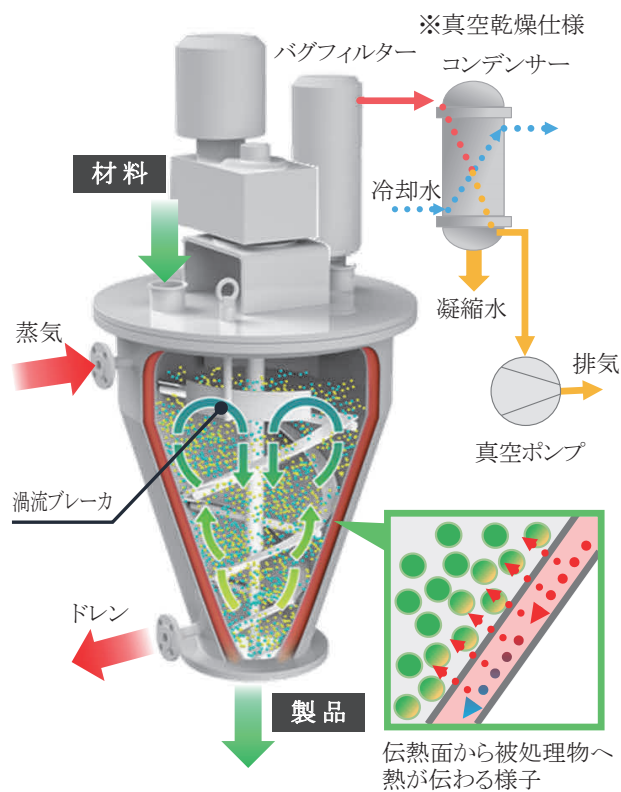


図-1 リボコーン概略図

また、混合性能は実装置での実験と合わせて粉体シミュレーションを用いた検証も行っている。混合性能試験は有効容量50 Lのリボコーンにてラクトースに対し赤色2号を0.5 mass%添加したものを混合し、装置内6か所からサンプリングし色素濃度を測定している。その試験結果を図-2に示す。混合時間5 min で色素濃度が0.5 mass%に収束した結果となった。

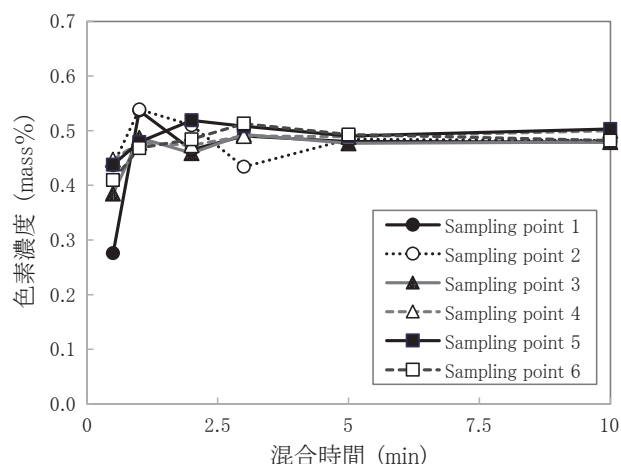


図-2 リボコーンの混合時間と色素濃度の推移
ラクトースに対し赤色2号を0.5 mass% 添加

次に粉体シミュレーションにて解析を行った断面の混合状態と粒子の動きを可視化した状態を図-3に示す。粉体シミュレーションを用いることで実際の装置では観察できない任意断面の混合状態や粒子の動きなどの可視化や数値化が可能である。粉体シミュレーションは扱う粒子数が多いほど計算負荷が高くなるため電子計算機の性能によるが当社では粒子数が数万～数十万個程度の規模にてシミュレーションを行うことが多く、比較的小型な装置が対象となる。

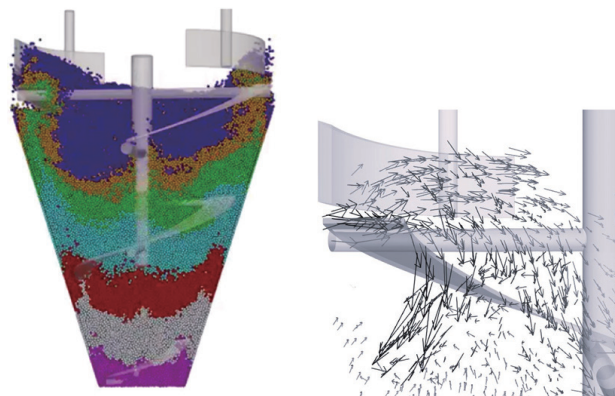


図-3 粉体シミュレーション断面の混合状態と粒子の動きの可視化

2-2 マイクロ波加熱

マイクロ波加熱は、家庭用電子レンジにも用いられている技術である。総務省統計局の調査²⁾では電子レンジの普及率は2000年代には90 %を超える値となっており、一般家庭に広く普及している。一方で産業分野での利用は限定的なものとされている。

先述の伝導伝熱や熱風などの熱源を材料に直接伝える対流伝熱は被処理物の外部から加熱を行うが、マイクロ波（周波数300 MHz～300 GHz）は電磁波の一種であり誘電加熱の原理により被処理物自体が発熱する内部加熱となる。被処理物をマイクロ波の電界の中に置くと、被処理物を構成している分子（永久双極子）が電波（電界）の力を受け、マイクロ波の周波数に応じ激しく振動する（家庭用電子レンジでも用いられている2450 MHzの場合、24億5千万回/秒となる）。この時、各分子間で摩擦熱が発生し被処理物が発熱・昇温する。

乾燥目的で使用した場合、被処理物に含まれている水分を選択的に沸点まで加熱昇温し、さらに蒸発分の熱量が供給されることで水分を蒸発させることができる。

マイクロ波加熱のメリットとしては以下のことがあげられている。

- 内部加熱

先述の通りマイクロ波は被処理物の内部に浸透し、被処理物自身が発熱・昇温する。

- 加熱効率が高い

被処理物のみを直接加熱するため、エネルギーのロスが少なく、省エネルギーである。

- 選択的加熱

特定の物質（例えば水分子）を選択的に加熱できるため、特定の用途に適している。

- 温度制御が容易

出力を調整することで精密な温度制御が可能で、特定の温度に保つことができる。

マイクロ波加熱を取り扱う場合は、局所的な過熱の防止や人体に健康上の影響が出ないよう電磁波の漏洩を防止する必要がある。

2-3 ハイブリッド型乾燥装置「マイクロ波加熱リボコーン」

先述の伝導伝熱方式の乾燥装置「リボコーン」とマイクロ波加熱技術を最適に組み合わせたハイブリッド型の乾燥装置「マイクロ波加熱リボコーン」をマイクロ波技術の専門メーカーである山本ビニター(株)と共同で商品化した。写真-2に当社試験室に設置した試験機の外観、図-4に装置概要を示す。

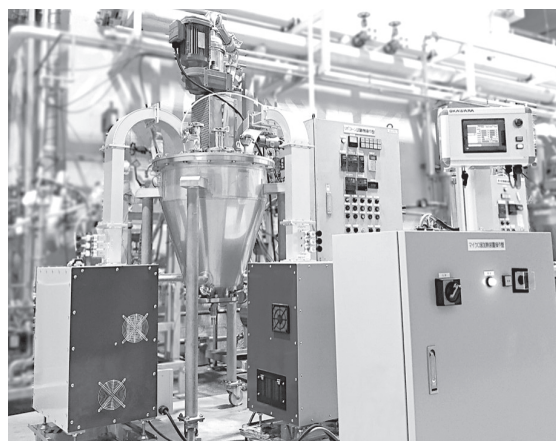


写真-2 マイクロ波加熱リボコーン 試験機
(有効容量50 L)

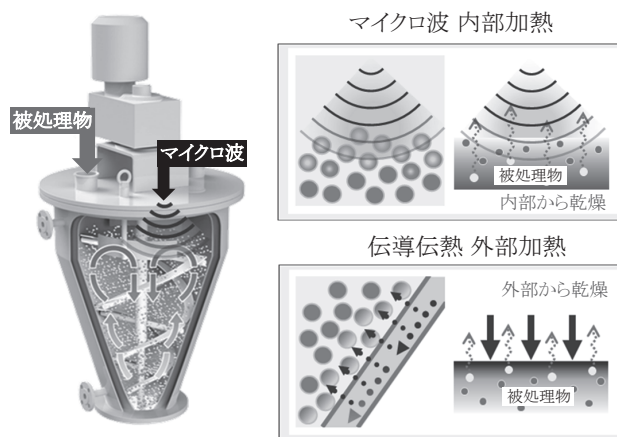


図-4 マイクロ波加熱リボコーン概要

「マイクロ波加熱リボコーン」は複数の加熱方式にて被処理物を加熱することができる。従来、伝導伝熱のみの方式では極めて低いレベルの水分まで乾燥させる場合、長時間かけて運転していたケースではマイクロ波加熱を併用することで短い時間で目標の水分に到達することが期待できる。また、ペレット状の被処理物の場合、伝導伝熱のみでは材料の中心まで加熱する際に時間を要するがマイクロ波加熱を併用することで内部からも加熱することが可能となり短い時間で目標温度に到達する

ことが期待できる。

「マイクロ波加熱リボコーン」の特長を以下に整理する。

- リボコーンの攪拌による循環流によりマイクロ波の局部加熱や加熱ムラを抑制し、均一に加熱できる。
- 内部加熱の効果により乾燥による収縮を低減、ポーラスな乾燥品が得られる。
- 内部加熱により内部水分を蒸発させ、塊状や凝集体の崩壊を促すことで粉粒体の乾燥品を得られる。
- マイクロ波 + 真空伝導伝熱により乾燥時間の短縮ができ、設備全体としては省エネルギーに期待ができる。

一般的にマイクロ波の加熱効率は出力に対して7割程度³⁾といわれているがリボコーンと組み合わせることで伝導伝熱との併用となり、加熱された被処理物と壁面との温度差が小さくなるため材料から壁面への放熱量が減少し、マイクロ波加熱を有効に使うことが可能となる。

2-4 「マイクロ波加熱リボコーン」の適用事例

適用事例としてゼオライト、炭酸カルシウムを乾燥処理した試験を紹介する。通常の伝導伝熱のみのリボコーンとマイクロ波加熱を併用した試験結果を示す。

図-5にゼオライトを乾燥処理したときの乾燥曲線を示す。被処理物の含水率33.3 % D.B. (25 % W.B.) から5.3 % D.B. (5 % W.B.) を目標に実施した乾燥処理である。このときのマイクロ波の出力は1.5 kW である。

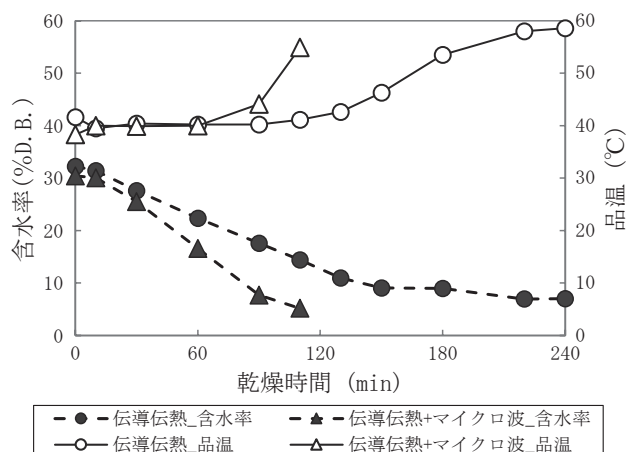


図-5 ゼオライトの乾燥曲線

通常の真空伝導伝熱のみの乾燥では、120 min までは品温と含水率の低下傾向が一定となっており、この期間が定率乾燥期間と考えられる。その後、品温が上昇し乾燥速度が低下する減率乾燥期間を迎え、240 min まで運転したところで含水率 5.3 % D.B. に到達した。

次にマイクロ波加熱を併用した条件では定率乾燥期間が短く、80 min で含水率が10 % D.B. 以下まで低下し、品温上昇が見られた。含水率5.3 % D.B. の到達は110 min 程度であった。マイクロ波加熱併用時は減率乾燥期間時に品温が上昇し始めても水分蒸発量の低下が少なく、品温上昇が速いため、短時間で目標の含水率までの乾燥処理が可能であった。

次に被処理物は同様に加熱条件、マイクロ波出力を変化させた試験の含水率と蒸発速度の変化を図-6に示す。マイクロ波出力に応じ乾燥速度が変化する傾向が見られる結果となった。

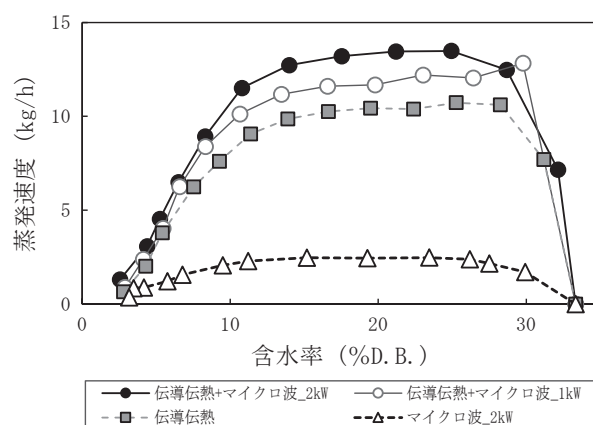


図-6 ゼオライトの含水率と蒸発速度

次に図-7に炭酸カルシウムを乾燥処理した時の装置内の状況を示す。本材料は通常の真空伝導伝熱のみのでは運転開始60 min の時点でリボンスク

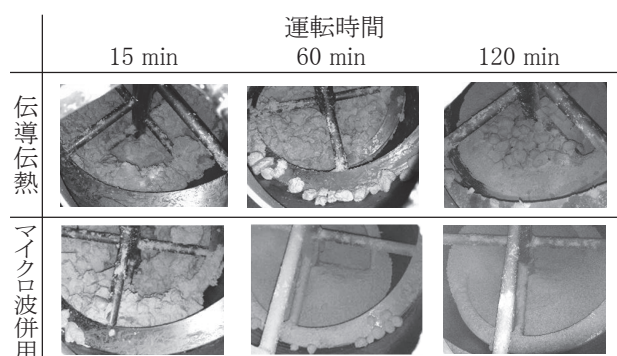


図-7 炭酸カルシウム乾燥時の装置内の状況

リューの攪拌によって数cm程度の凝集物が多数形成されており、一部はリボンスクリュー下部で塊状になっておりリボンスクリューと一緒に回転している状態であった。この場合、伝熱面に接している材料が更新されないため、表面のみ乾燥が進行し、乾燥速度が低下する傾向が見られた。また、凝集物となった被処理物は、乾燥した表面が攪拌により徐々に粉化しながら乾燥が進行するため乾燥に長い時間を要した。

マイクロ波加熱を併用した条件では乾燥初期にリボンスクリューの攪拌によって凝集物が形成される傾向は同様であったが、マイクロ波加熱により凝集物内部からも加熱されるため、表面と内部の両方から蒸発が促進される。伝導伝熱のみの運転に比べ、内部の水分が早い段階で低下することで、攪拌により凝集物の崩壊が促進され、表面積が増加や適正な混合状態となることで、低水分まで乾燥速度の変化が少ない運転となったと考えている。

伝導伝熱のみとマイクロ波加熱併用を比較すると、マイクロ波加熱併用ではマイクロ波を発生させるための電力が必要となるため単位時間あたりの消費エネルギーは増加するものの短時間で運転が終了することから、付帯機器などを含めた1バッチあたりの消費エネルギー量は減少するため省エネルギーな運転となる。また運転時間やサイクルタイムが短縮されるため生産効率の向上にも貢献できるものと考えている。

3. おわりに

当社では今回紹介した「マイクロ波加熱リボコーン」をはじめとして各種乾燥装置や濃縮装置などの試験機を取り揃えている。また、新たに電池材料向けに高温加熱（最大350℃）が可能なりボコーンの試験機（有効容量50 L）を設置し、試験実施体制を整えている。

当社の各種試験機をご活用いただくことで、お客様の付加価値ある製品開発に貢献できることを期待している。

参考文献

- 1) 中村正秋、立元雄治：“初歩から学ぶ乾燥技術 — 基礎と実線 —”，丸善出版(株)、2、pp. 5-11 (2013)
- 2) 総務省統計局：“主要耐久消費財の所有状況”，総務省統計局、<https://www.stat.go.jp/data/zensho/2004/taikyu/gaiyo1.htm> (2025年4月8日)
- 3) 山本ビニター(株)：“マイクロ波加熱の特徴”，電波加熱研究所、<https://www.vinita.co.jp/institute/microwave/040080.html> (2025年4月8日)
- 4) 杉本隼人：“マイクロ波加熱リボコーンとその活用事例”，化学装置、67(3)、pp. 16-19 (2025)

すぎもと はやと
杉本 隼人
(株)大川原製作所
開発部 開発課 課長

〒421-0304 静岡県榛原郡吉田町神戸1235
TEL : 0548-32-3212
E-mail : h-sugimoto@okawara-mfg.jp