

Indirect Dryer for the Next Generation

Masayoshi KAWAHARA¹

Introduction: In industrial settings, drying slurry and clay-like materials can be achieved through direct or indirect heating methods. The Solidaire™ dryer, an indirect heating dryer, stands out due to its efficient combination of jacket heating and high-speed paddle agitation. This study explores new technological advancements in Solidaire to enhance its drying capabilities.

About Solidaire™: The Solidaire dryer indirectly transfers heat to the material via a heated jacket while agitating the material with high-speed rotating paddles, ensuring efficient and rapid drying. The internal structure includes a cylindrical casing with a surrounding heating jacket and a rotating paddle assembly. The paddles' high rotating speed helps to break down agglomerates, reducing the residence time and minimizing heat damage to the material.

Experimental methods: A series of tests was conducted to evaluate the effects of increased paddle rotating speed and reduced clearance between the paddles and the casing. These tests used a prototype designed to achieve higher paddle speeds and adjustable clearance. Experiments were conducted using a lightweight calcium carbonate slurry (primary particle size 150 nm, 67% W.B.), which is prone to adhesion. The overall heat transfer coefficient and moisture content of the dried product were measured under various conditions.

Results and Discussion:

1. Clearance Effect: Reducing the clearance between the agitator paddles and the inner wall increased the overall heat transfer coefficient, likely because of a decrease in the thickness of the boundary layer (L_p in Fig. 3).

2. Paddle Speed Effect: Increasing the paddle peripheral speed from the standard 11 m/s to 22 and 33 m/s improved the overall heat transfer coefficient (Figs. 7–9). Higher speeds facilitated particle dispersion, increased contact between particles and the heated wall, and reduced adhesion.

3. Jacket Temperature Effect: Higher jacket temperatures (steam pressures) increased the overall heat transfer coefficient and reduced the moisture content of the dried product, as expected (Figs. 11–14).

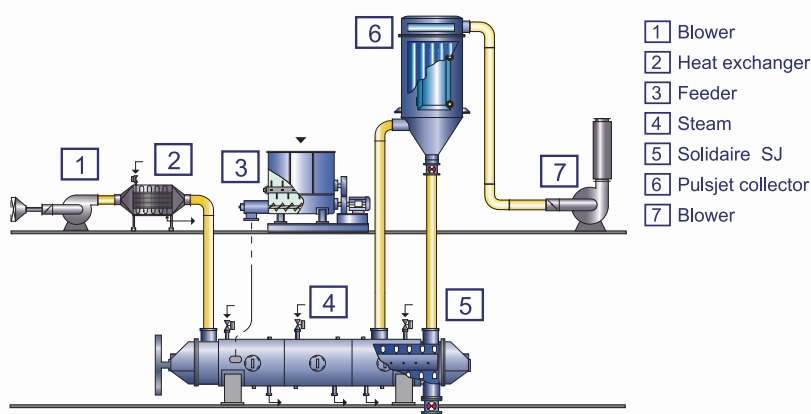
4. Adhesion Reduction: Higher paddle speeds effectively reduced adhesion inside the dryer, which is a common issue in drying operations (Fig. 15).

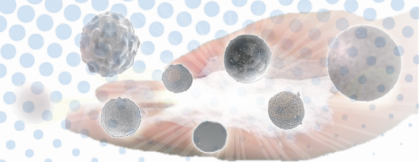
Conclusions: The study demonstrated that increasing the paddle rotating speed and optimizing the clearance in the Solidaire™ indirect heating dryer significantly improved the drying capacity by enhancing the overall heat transfer coefficient and reducing adhesion. These findings provide insights into the development of next-generation dryers with improved performance for various industrial applications.

Keywords:

Solidaire™
 Indirect heating dryer
 High-speed rotating
 Wet powder
 Slurry
 Solvent

¹ Fellow, Powder Technology
 Research Institute, Hosokawa
 Micron Corporation, JAPAN





次世代へ繋げる間接型乾燥機の開発について

河原 正佳

ホソカワミクロン株式会社 粉体工学研究所 フェロー

抄 録

ソリッドエアー[®]は、ジャケットによる加熱と高速で回転するパドルでの攪拌によって熱を伝達し、原料を短時間で効率よく乾燥できる間接加熱型乾燥機である。その特徴の一つである高速回転翼をさらに増速させた場合の乾燥能力への影響を試験した。結果として、回転速度（攪拌翼の周速）は乾燥能力向上に効果があり、付着も低減可能であることが判明した。次世代の乾燥機のヒントとなるデータのの一つとしてここに紹介する。

1 はじめに

産業界において、スラリーや粘土状の原料を乾燥させる方法を大別すると直接加熱法と間接加熱法がある。前者は熱風などを原料に直接接触させて熱交換を行い乾燥させる方法で、後者は、たとえば、容器内の原料に対して容器壁の外部から加熱して間接的に熱量を与えて乾燥させる方法である。それぞれの方法にはメリットおよびデメリットがあり、扱う原料の物性値（粘度、含液率、融点、粒子径など）、最も効率的に乾燥可能な手段、熱的条件（原料の品質や付帯設備の熱源能力など）、得られる乾燥品の物性値（含液率、粒子径、形状など）、連続運転可否（機械的な問題、動力的な問題、乾燥機内の付着度合いなど）などにより乾燥方法が選定される。

当社では直接加熱法と間接加熱法の乾燥機群があり、ユーザーが処理手段に困られている設備導入などにそれぞれ対応できるように努めてきたが、その中のソリッドエアー[®]タイプの間接加熱型乾燥機について、現在取組んでいる新たな技術探索について報告する。

2 ソリッドエアー[®]について

2.1 概要

ソリッドエアー[®]はジャケットによる加熱と高速で回転するパドルでの攪拌によって熱を伝達し、原料を短時間で効率よく乾燥できる間接加熱型乾燥機である（図1）。

この乾燥機の基本的な設備のフローシートを図2に示す。原料は図2中の3フィーダから5ソリッドエアーへ供給されてその内部で乾燥された後に排

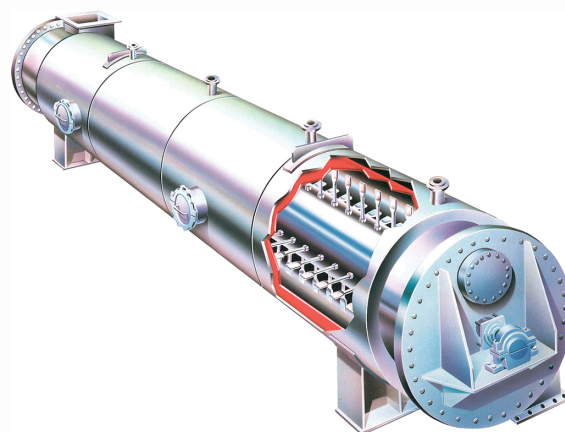


図1 ソリッドエアー[®]

Fig. 1 SolidaireTM.

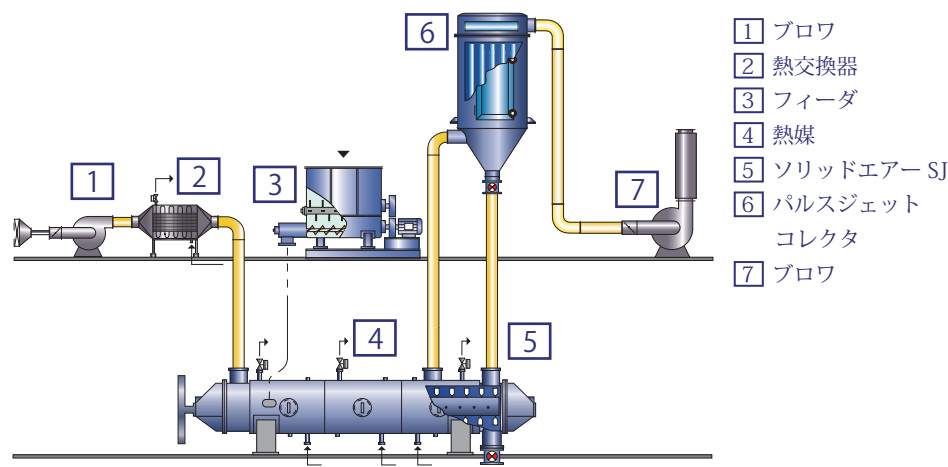


図2 ソリッドエア®の基本的な設備のフローシート

Fig. 2 Solidaire™ basic equipment flowsheet.

出される。この時、乾燥させるために必要な熱量は乾燥機外部のジャケットへ4熱媒（温水、水蒸気や高温熱媒液）を供給することにより与える。機内で原料から発生した蒸発ガスは6パルスジェットコレクタを通して7ブロウにより排気される。蒸発ガスが有機溶剤などの有害・危険物質である場合は、7ブロウ前に冷却用コンデンサなどの装置を設置して液体として回収する。蒸発ガス中には乾燥され飛散する微粒子も含まれるので、6パルスジェットコレクタで固気分離され、粉体は乾燥機に戻される。

この乾燥機は恒率乾燥区間での乾燥や付着しやすい原料の乾燥に適しており、また、使用するキャリアガス（原料からの蒸発ガスを搬送するガス）量が少なくてもよいという利点があり、その結果、総排ガス量中の原料蒸発ガス量比を高くとることができ、揮発性溶剤などの回収（コスト的には冷却用コンデンサなどの設備容量を小さくできる）にメリットがある。また、乾燥機としてだけでなく、乾燥後の冷却機としても使用できる。

この乾燥機は、樹脂をはじめ食品、医薬品、顔料、染料などの幅広い産業分野で使用されており、特に樹脂乾燥時に発生する溶剤の回収システムおよびポリエステル系樹脂の結晶化機として多くの納入実績がある。

2.2 構造と特長

ソリッドエアの構造（図1）は、加熱用（冷却用）ジャケットが全周を覆う水平円筒型ケーシングと多

数のパドルが取り付けられた攪拌ロータで構成され、ジャケットには温水、水蒸気や高温熱媒液（冷却の場合は工場用水、冷水や冷媒液）が流れる構造になっている。このジャケットからケーシング内の粉体に間接的に熱量が与えられるが、このとき、攪拌ロータの回転力により、粉体はケーシング内壁を旋回している。原料はケーシング内壁から与えられる熱量により乾燥が進行し、乾燥機出口へと向かう。このジャケット内の熱媒体の温度を調節することにより乾燥品の温度を制御することが可能になる。

攪拌ロータに取り付けられたパドル（攪拌翼）は異なる角度（水平円筒方向に対して45°、90°、135°など）に変更することができ、ケーシング内の粉体に対して、推進力、攪拌力およびバックミキシング効果を与えることにより、滞留時間や攪拌力の調整ができる。

付加的操作として、キャリアガスを使用することにより機内の結露防止や微粉の除去なども同時に行うことが可能であるが、その流れ方向は、機内品と同じ流れ方向（並流）あるいは反対の流れ方向（向流）のどちらにも乾燥の最適処理手段として対応することが可能である。

ソリッドエアの第1の特長は、内部攪拌ロータの回転が速いことである。一般的な内部回転攪拌ロータを有する間接加熱型乾燥機よりも高速で回転し、これにより、原料中の凝集塊や、機内で二次的に生成される凝集物をパドルによって解きほぐすことができる。その結果、滞留時間を短くすることが

でき、粉体への熱損傷を抑えることが可能である。第2に乾燥時間の調整が比較的容易に可能であるという特長がある。パドルの取付け角度や回転速度の変更によりその時間を可変できる。そして、第3の特長として、外気遮断が容易であることが挙げられる。窒素などの不活性ガスをキャリアガスとして使用することにより酸化しやすい原料の乾燥や可燃性のある揮発性溶剤の回収が可能である。

3 性能向上のための実証試験例

3.1 乾燥機構について

ソリッドエアーの伝熱についての基本的な機構^[2]は図3のように考えることができる。図3中央の乾燥機ケースは円筒であり、その内側（図3右側）で攪拌ロータが回転している。図3の左側が機内の粉体へ熱量を与えるための乾燥機のジャケットで、この場合は熱媒体として水蒸気で表している。この熱量は図3中央の乾燥機ケース（壁）を通して乾燥機内部の粉体へ与えられる。

図3はその時の温度変化のイメージ図である。伝熱温度は T_1 から T_4 まで降下するが、その際、水蒸気の境膜と機内粉体層の境膜が総括伝熱係数^[3]を低下させる原因となる。特に、水蒸気の境膜に比較して機内粉体層の境膜の影響が大きく、乾燥機の伝熱面積部分に粉体の付着が生じると熱効率が大幅に低下する。時にはその付着層は乾燥機ケースの厚みよりも大きくなることもある（ $L_w < L_p$ ）。

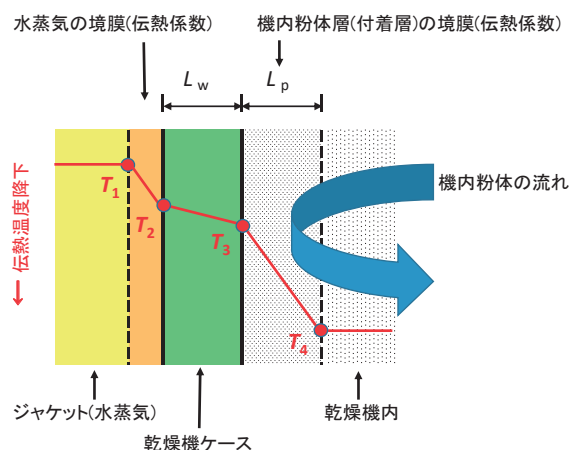


図3 ソリッドエアー®の伝熱機構

Fig. 3 Heat transfer mechanism of Solidaire™.

このことから、攪拌ロータ型の乾燥機においては、以下の2点が乾燥能力（総括伝熱係数）を向上させる重要なパラメータとなる。

- ①原料を分散させることによる粒子化、ケース伝熱部との接触回数増加、付着層の除去などへ大きく寄与する攪拌翼の周速
- ②同様に効果のある乾燥機ケース内壁と攪拌翼先端とのクリアランス

これらのパラメータの影響を調査するために、種々の試験を行った結果を次項に示す。

3.2 攪拌翼の周速について

間接加熱型乾燥機として当社ではミクロン サーモプロセッサ[®]^[4]（図4）やトーラスディスク^[5]（図5）などがあるが、これらの機器の攪拌翼周速をソリッドエアーと比較すると図6のようになる。一般的に間接加熱型乾燥機は低速であり、ソリッドエアーは高速な部類に入る。前述の観点から、乾燥能力への影響を調べるために、試験に用いたプロトタイプ機ではさらに高い攪拌翼周速が得られるように設計した。

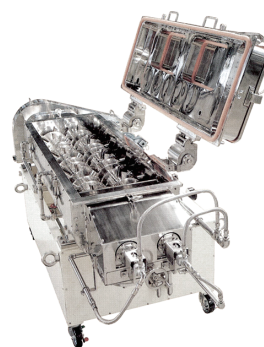


図4 ミクロン サーモプロセッサ®

Fig. 4 Micron Thermo Processor.

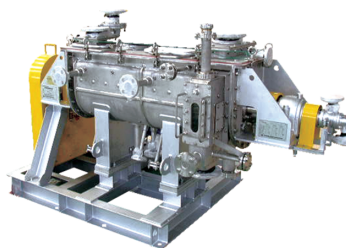


図5 トーラスディスク

Fig. 5 TorusDisc.

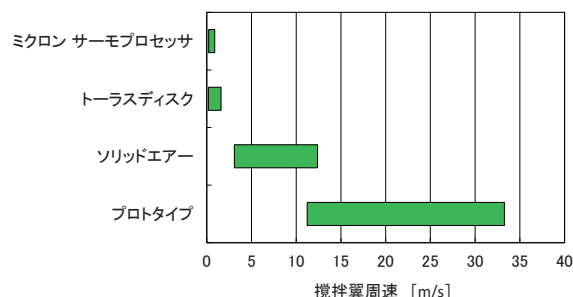


図6 間接加熱型乾燥機の攪拌翼周速

Fig. 6 Peripheral speed of agitator paddle on indirect heating type dryer.

3.3 攪拌翼周速とクリアランスの乾燥能力への影響について

試験で用いたプロトタイプ機は、攪拌翼の周速（攪拌ロータ回転数）およびクリアランス（乾燥機内壁と攪拌翼先端との距離）が変化可能な構造で、これらをパラメータとして総括伝熱係数への影響を調べた。全体の構造はソリッドエアー（図1）と同等である。

以降のすべての試験は比較的付着が生じやすい軽質炭酸カルシウムのスラリー（1次粒子径 150 nm, 67%W.B.）を原料に使用した。

1) クリアランス変化による総括伝熱係数への影響 1

はじめにクリアランスの総括伝熱係数への影響を供給速度に対して調べた（図7）。攪拌翼周速 11 m/s はソリッドエアーと同等の周速であり、この値を比較基準とした。この図より、以下のことがわかる。

- ①供給速度に対する総括伝熱係数の値はクリアランスが狭い方（3 mm）が高い。
- ②クリアランスを狭めることは図3の L_p の低減へ寄与している。

2) クリアランス変化による伝熱係数への影響 2

図8は、図7の攪拌翼周速を2倍にした場合の結果である。この図からも、以下のことがわかる。

- ①クリアランスが狭い方（3 mm）が総括伝熱係数は高い。
- ②2倍の周速（22 m/s）はいずれのクリアランスにおいても基準周速（11 m/s）よりも総括伝熱係数が向上した。

周速を上昇させることにより、原料の分散粒子化、付着除去あるいは機内粉体の接触回数増加の効果が現れたと考えられる。

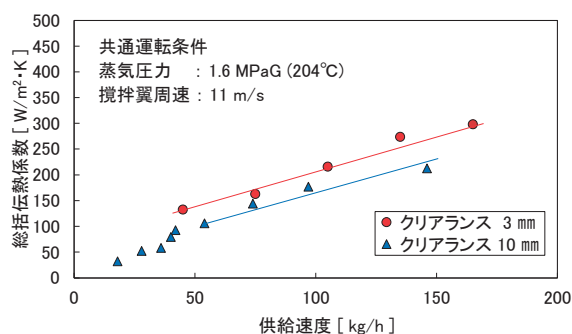


図7 クリアランス変化による総括伝熱係数への影響 1

Fig. 7 Effect 1 of clearance changes on overall heat transfer coefficient.

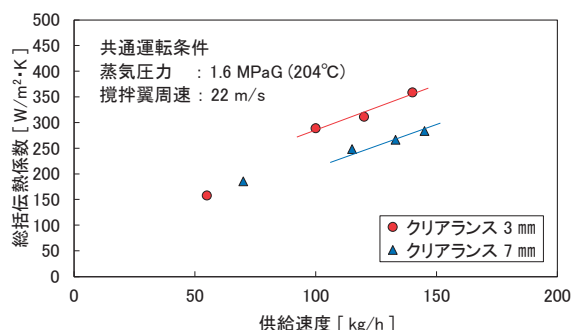


図8 クリアランス変化による総括伝熱係数への影響 2

Fig. 8 Effect 2 of clearance changes on overall heat transfer coefficient.

図8において、供給速度が低い値になるにしたがい各クリアランスに対する総括伝熱係数の値は接近する傾向がある。これは以降のすべての試験においても同様であるが、特徴を捉えるために供給速度の高い方を直線で図示した。

3) 攪拌翼周速による総括伝熱係数と乾燥品湿分への影響

次に攪拌翼周速をさらに図7の3倍にした場合をクリアランス 3 mm に対して調べた（図9）。結果として、以下のことがわかる。

- ①総括伝熱係数は、攪拌翼周速が2倍（22 m/s）の場合よりも3倍（33 m/s）の場合の方が高い。
- ②周速増加は総括伝熱係数の増加に効果がある。

図10は、図9の場合のプロトタイプ機の乾燥品湿分を供給速度に対してプロットした図である。この図から、以下のことがわかる。

- ①攪拌翼周速が2倍（22 m/s）以上では乾燥品湿分が1%W.B. 以下であった。

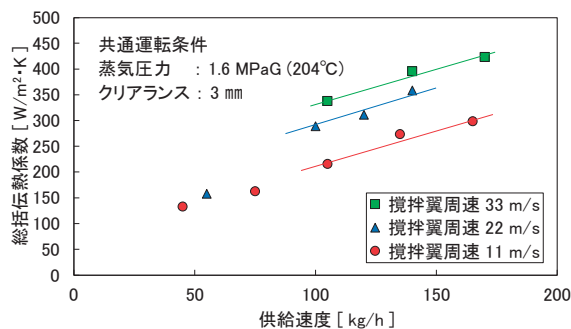


図 9 攪拌翼周速変化による総括伝熱係数への影響

Fig. 9 Effect of peripheral speed changes of agitator paddle on overall heat transfer coefficient.

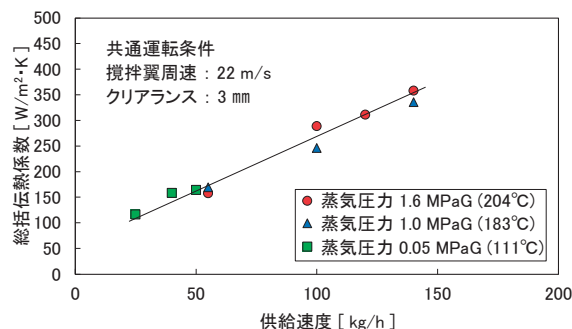


図 11 ジャケット温度変化による総括伝熱係数への影響 1

Fig. 11 Effect 1 of jacket temperature changes on overall heat transfer coefficient.

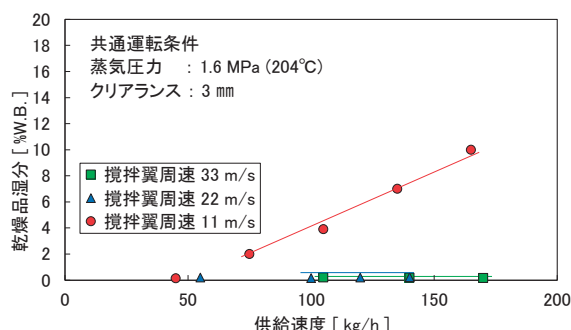


図 10 攪拌翼周速変化による乾燥品湿分への影響

Fig. 10 Effect of peripheral speed changes of agitator paddle on moisture content of dried product.

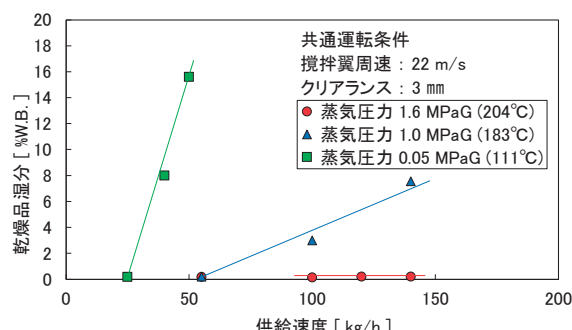


図 12 ジャケット温度変化による乾燥品湿分への影響 1

Fig. 12 Effect 1 of jacket temperature changes on moisture content of dried product.

② 11 m/s での高供給速度側では 1%W.B. 以上の値を示した。

実装置では乾燥能力が装置選定の条件になるので、攪拌翼周速増大は非常に効果があるといえる。

4) ジャケット温度による総括伝熱係数と乾燥品湿分への影響 1

ジャケット温度（蒸気圧力）は総括伝熱係数にどのように影響を与えるのかを調査した。攪拌翼周速が 2 倍（22 m/s）の場合の結果が図 11 で、以下のことがわかる。

① 各ジャケット温度に対する供給速度と総括伝熱係数の関係はほぼ一定の直線で表せられた。

② この試験における供給速度と乾燥品湿分との関係（図 12）は、当然ではあるが、ジャケット温度が高くなるにしたがい乾燥品湿分が低下した。

5) ジャケット温度による総括伝熱係数と乾燥品湿分への影響 2

攪拌翼周速が 3 倍（33 m/s）の場合も同様に調査し、

以下のことがわかる。

① 図 11 と同様に、供給速度と総括伝熱係数の関係は各ジャケット温度に対してほぼ一定の直線を示した（図 13）。

② この場合の供給速度と乾燥品湿分との関係（図 14）は、図 12 のジャケット温度 183°C の場合に対して乾燥品湿分が低下しており、周速の増加が湿分低下に寄与している。

以上より、攪拌翼周速とクリアランスが図 3 の概念図の L_p の厚みや L_p 領域での粒子群の挙動に起因する境界係数減少に対して大きく影響を与えることが示唆された。上記以外の図 3 の L_p 領域に関する効果的対策としては攪拌翼の形状など他のパラメータもあるが、本報告では割愛する。

乾燥機で最も問題となる付着に関しても、攪拌翼の高速化はその低減に寄与することを確認した。軽質炭酸カルシウムのスラリー（1 次粒子径 150 nm, 67%W.B.）を原料として乾燥した場合の結果を

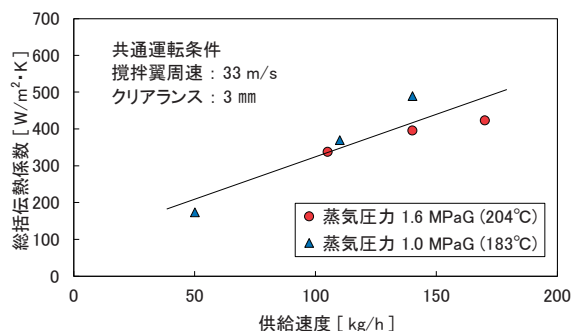


図 13 ジャケット温度変化による総括伝熱係数への影響 2

Fig. 13 Effect 2 of jacket temperature changes on overall heat transfer coefficient.

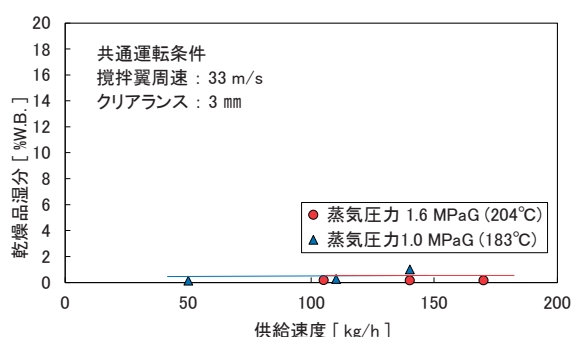


図 14 ジャケット温度変化による乾燥品湿分への影響 2

Fig. 14 Effect 2 of jacket temperature changes on moisture content of dried product.

15 に示す。図 15 には、ソリッドエアーとプロトタイプ機の運転後の機内状況が示されており、プロトタイプ機では付着を防いでいることがわかる。他にも従来乾燥が困難な石膏スラリー（平均粒子径 50 μm , 67%W.B.）に対しても、付着による攪拌翼ロータの動力増加を防ぐことができることを確認している。



A) ソリッドエアー®

B) プロトタイプ機

図 15 乾燥機内付着の違い

Fig. 15 Differences in adhesion inside the dryers.

4 おわりに

伝熱という観点から間接加熱型乾燥機の基礎的事項に着眼して、考慮すべきパラメータの影響についての試験を化学工学的に実施した。機械的な設計の困難さはあるものの、さらなる進化の可能性があることが判明したため、その内容の一部をここで紹介した。さまざまな仮説モデルと実証試験により、一つ一つの事象を理解して実現化していき、それらが統合された新商品を生み出していくことには時間を要するが、粉体の分野において最高の技術を使用していただくために、今後も研究開発を推進していく所存である。

References

- [1] ホソカワミクロン(株) 編：ホソカワ製品バンドブック, “ソリッドエアー® SJ”, pp. 326–329, 凸版印刷(株), 大阪 (2013).
- [2] 化学工学会 編：化学工学便覧, “対流伝熱”, pp. 270–272, 丸善(株), (1978).
- [3] 亀井 三郎 編：化学機械の理論と計算, “対流伝熱”, pp. 84–86, 産業図書(株), (1975).
- [4] ホソカワミクロン(株) 編：ホソカワ製品バンドブック, “ミクロンサーモプロセッサ® MTD”, pp. 334–335, 凸版印刷(株), 大阪 (2013).
- [5] ホソカワミクロン(株) 編：ホソカワ製品バンドブック, “トーラスディスク TD”, pp. 330–333, 凸版印刷(株), 大阪 (2013).

著者紹介



河原 正佳 Masayoshi KAWAHARA

〔経歴〕 1985 年秋田大学大学院卒業。同年ホソカワミクロン株式会社入社。粉体システム事業本部を経て、1993 年粉体工学研究所に所属し、2022 年から現職。

〔専門〕 粉体処理装置（粉砕、分級、乾燥、混合、集塵、粒子設計など）と熱処理装置（焼却炉、反応炉など）。

〔連絡先〕 mkawahara@hmc.hosokawa.com