

噴霧乾燥装置の特徴と設計の実際

Suitable design focusing on the characteristics of spray dryer

濱田賢良

Takayoshi HAMADA

要 旨 : 噴霧乾燥装置（スプレードライヤ）は液状原料から直接、乾燥粉末を得ることができる乾燥装置である。噴霧乾燥装置で作られる製品は多岐に渡り、食品、医薬品、香料から化学製品やセラミックスなどがある。そのため、それぞれの液状原料について設計が必要となり、設計前の噴霧乾燥試験は非常に重要である。噴霧乾燥装置を構成する各要素機器を中心に、装置設計における試験データの重要性を報告する。

Abstract : The spray dryer is able to make up powder from feed liquid directly. There are so many products made by it that are from food, medicine and perfume to chemical products and ceramics. Therefore, it is necessary to conduct the spray drying test for suitable designing to each feed liquid for various products. I report the importance of tested data for apparatus design, focusing on each elemental part which forms spray drying apparatus.

キーワード : 微粒化、液状原料、粉末製品

Keywords : Atomization, Feed Liquid, Powdering Product

1. はじめに

噴霧乾燥装置（スプレードライヤ）は液状原料を微粒化して粉末製品を作る乾燥機である。ヨーロッパにおける粉ミルクの製造に始まり、洗剤、食品、化学製品、医薬品、更にセラミックスや二次電池材料にいたるまで、液体を原料とする製品の乾燥に幅広く使われている。

そして、噴霧乾燥装置で扱う液状原料は千差万別で、それぞれ異なる性質を持ち、机上の検討だけでは装置設計は出来ない。そこで、装置設計では事前に液状原料を噴霧乾燥機で乾燥し、その乾燥データをもとに装置の設計する方法がとられる。本文では、試験データと装置設計との関連の重要性を噴霧乾燥装置の構成機器から報告する。

2. 噴霧乾燥装置の特長

様々な乾燥機のなかで、噴霧乾燥装置は他の乾燥機とは異なる特長を持っている。多くの乾燥機は固形物を扱い、その固形物は加熱部と直接接触し、伝熱を利用して乾燥が行われる。固形物を棚に敷いたり、容器のなかで攪拌したりして乾燥が行われる。しかし、噴霧乾燥装置では、全く異なる過程で乾燥が行われる。まず、乾燥原料が液体であることである。液体は固形物とは異なり流動性があるため、自由に形を変える（写真1）。条件を整えれば、液状原料を細かい霧状にして空中に分散することも可能である。



写真1：液状原料（イメージ）

この霧状に分散した液状粒子に熱風を当てることによって乾燥を行う乾燥機が、噴霧乾燥装置である。空中に分散された粒子は、それ自体の表面張力から球状になり、分散する。分散する前の液状原料の表面積はわずかであるが、細かく微粒化させればさせるほど、表面積は莫大に広がる。仮に1立方センチメートルの角砂糖状の液体を想像すると、その表面積は6平方センチメートルであるが、微粒化して直径100ミクロンの霧に分散させると600立方センチメートルに面積は増加する。その結果、乾燥速度も早くなり、液状原料は瞬時に乾燥する（図1）。

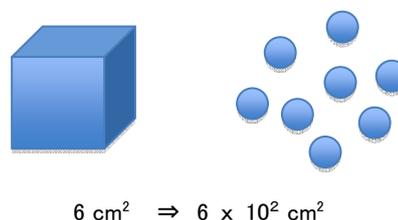


図1：微粒化による表面積の増加

先に述べた固形物の乾燥機では、加熱伝熱面に固形物が接触する構造のものが多く、加熱方法を工夫しても、加熱伝熱面の温度の影響を受け、被乾燥原料は焦げや化学変化を起こし、均一な乾燥物を得ることが困難である。

しかし、噴霧乾燥装置では、空間中に放出された球状の液状原料は、加熱伝熱面に接触することはなく、乾燥媒体としての熱風から熱を受ける。また、空間中で乾燥が完了するため、液状原料は球状を保った状態で乾燥が完了し、流動性の良い球状の乾燥製品を得ることができる。更に乾燥は短時間に完了し、乾燥製品は回収されるため、乾燥過程で液状原料の粒子の温度は上昇せずに周りの湿球温度以上には上昇しない。そのため、熱に弱い医薬品や食品の乾燥にも噴霧乾燥装置は利用されている（図2）。

表1に実際に噴霧乾燥装置で製造されている乾燥製品の例を示す。

このように、液状原料を微粒化して乾燥することによって、多くの特長を持つに至った噴霧乾燥

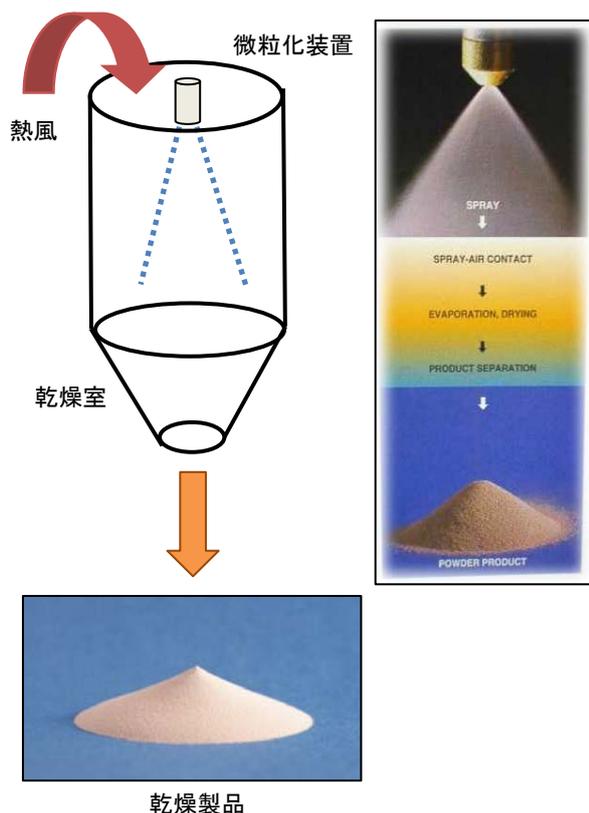


図2：噴霧乾燥の構造

表1：噴霧乾燥製品

食品	化学製品	無機物	医薬品
調味料	塩化ビニル	セラミックス	漢方
香料	樹脂	超硬合金	乳酸菌
粉ミルク	凝集剤	電池材料	酵素

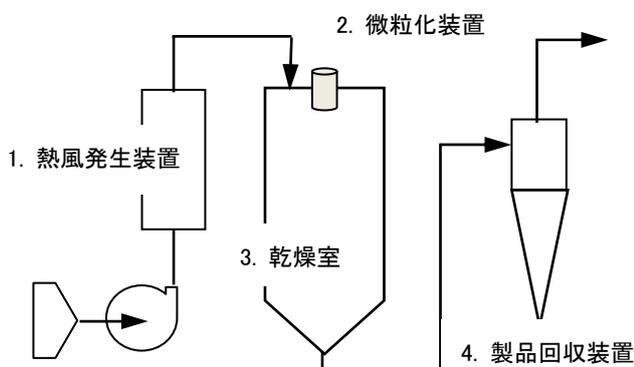


図3：噴霧乾燥装置の要素機器

装置であるが、構造は比較的単純で四つの構成要素から成り立っている（図3）。そのうち、乾燥媒体である熱風を発生させる熱風発生装置は加熱源が何であるかで決まる。蒸気、ガス、電気など様々な熱源が利用でき、噴霧乾燥装置として特徴的な構成要素ではないので、本文では触れない。

3. 構成要素の設計

3.1 微粒化

まず、噴霧乾燥装置で最も重要な構成要素として、液状原料を微粒化する微粒化工程がある。液状原料が微粒化される過程は、ドンブロスキーやレイリーらによって、液膜や液柱が振動し、液滴になる過程をモデル化して発表されている（図4）。また、マスターやフリードマンらは微粒化装置であるノズルや回転式の微粒化装置（写真2）を使って、実際に液体を微粒化し、液体の粘度や比重などの物理常数や微粒化装置の運転条件から、粒子径の大きさを実験で確認し、数式化している（図5）。

ただし、これらの計算式は実験式であるため、実験室規模に限定された範囲において有効である。そのため、微粒化装置の違い、液状原料の噴霧量や乾燥などの二次的な処理が加わる噴霧乾燥装置の設計では参考値でしかない。

また、実際に噴霧乾燥装置で取り扱う液状原料は複合原料が多く、単体の原料で微粒化、乾燥することは稀である。例を示すと、粉末調味料はタンパク質を分解してアミノ化する。そして、中和工程から塩分が生成、さらに様々な添加物などが加わり取り扱いの難しい液状原料である。また、セラミックスの代表的なアルミナは、酸化アルミニウムを基材としているが、水を溶媒としてスラリー化する過程で、多くの薬品がブレンドされる。その種類は十種以上となり、最終的にどのような目的をもった製品になるかによって、スラリーの内容物は異なってくる。

噴霧乾燥装置で扱う液状原料は、微粒化の観点から考察しても、多くの条件を含んでいるため、

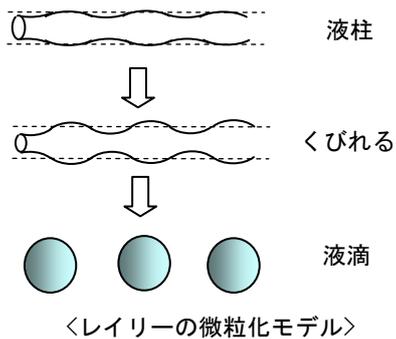
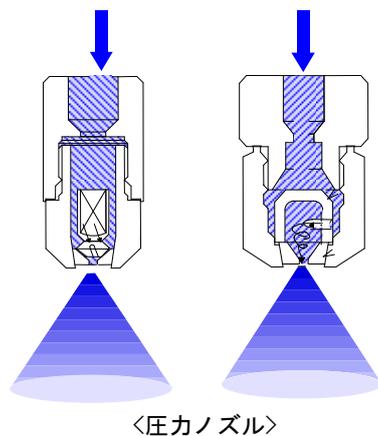


図4：液体の微粒化モデル



<回転円盤式 微粒化装置>

写真2：微粒化装置

$$D_{50} = K \frac{W^a}{N^b D^c}$$

<マスターの微粒化式>

$$\frac{Ds}{r} = 0.4 \left(\frac{\Gamma}{\rho nr^2} \right)^{0.6} \left(\frac{\mu}{\Gamma} \right)^{0.2} \left(\frac{\sigma \rho L}{\Gamma^2} \right)^{0.1}$$

<フリードマンの微粒化式>

図5：液体の微粒化式

厳密には実際の微粒化装置を使って微粒化試験をすることで、真の粒子径を把握することが出来る。

3.2 乾燥

微粒化された液状原料は乾燥室とよばれる空間の中で、熱風と接触し乾燥が瞬時に行われる。乾燥室の下部では、ほぼ乾燥は完了し、液滴は流動性の良い粒子状の乾燥製品に変化している(図6)。

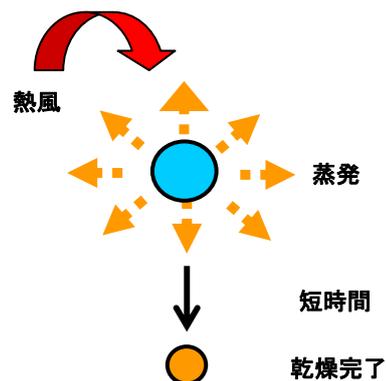


図6：粉乾燥の乾燥過程

しかし、たとえ微粒化が良好で均一で細かい粒子となっても、油のような水分を含まない液状原料は乾燥できず、全て乾燥室の壁面に付着する。乾燥しない液状原料は噴霧乾燥装置の形式に関わらず熱を用いた乾燥機による粉末化は出来ない。

油のような粉末化できない液状原料の場合は、原液調整の段階で油を乾燥可能な膜剤中に細かく分散させる乳化を行うことにより、噴霧乾燥装置で粉末化が可能である。これらを粉末油脂と言い、ミルクパウダーや香料はそれに該当する。

この場合も、実際に乳化調整を行った液状原料で、噴霧乾燥装置を使った乾燥試験を行ない、乳

化条件を含む運転データを収集しなければ、噴霧乾燥装置の設計はできない。

また、一旦乾燥が完了して球状の乾燥製品が得られても、粉末製品の特性から静電気を帯びたり、乾燥室壁面との親和性から乾燥製品が乾燥室内の壁面に付着したりする場合がある。これらの付着を静電気付着や固有付着と呼び、未乾燥の付着とは異なる。未乾燥の付着であれば、微粒化や乾燥温度を調整することによって解消することが可能であるが、静電気付着や固有付着については粉末製品の特性に依存するため、微粒化や乾燥温度などの運転調整のみでは解決しない。

そのため、乾燥室内の壁面を孔のあいたパイプを回転させ、その孔から高速の空気を吹き出させ、固有付着した乾燥製品を吹き落とすエアスイーパーとよばれる装置や衝撃力で叩き落とすエアノックなどの装置を付加することがある。これらの装置の効果も実際に乾燥試験を行って確認して採用するか否かを判断する。

3.3 粉末製品の回収

乾燥が完了した粉末製品は、乾燥排ガスと分離され、袋詰めされて出荷される。乾燥直後の粉末は不安定で、分離回収装置であるサイクロンやバッグフィルタの選定には注意が必要である。また、セラミックスなどの酸化物原料の粉末製品は非常に硬く、遠心力を利用して分離するサイクロンの内壁面を摩耗させることがあり、導入風速、材質などサイクロンの設計に注意する必要がある。

また、乾燥直後の粉末製品の品温は乾燥排ガスの温度に近づき、一般的には80℃前後になる。その状態で粉末回収して袋詰めすると粉末製品が冷える過程で再吸湿しブロッキングを起こす。そのため、サイクロンで回収した粉末製品を更に調整した空気輸送して冷却し、安定した状態にさせて回収する。

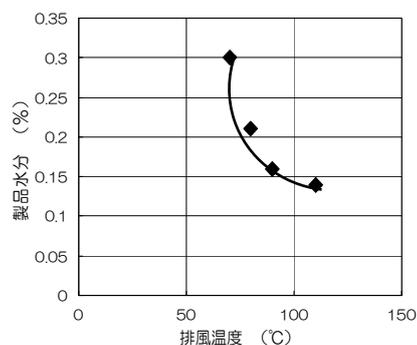
これら粉末製品の回収方法についても、実際に噴霧乾燥試験を行うことによって、乾燥後の粉末製品がどのような状態であるかを把握し、最終的な分離方法を決定しなければならない。

以上の通り、噴霧乾燥装置の構成機器の設計に当たって、机上の検討だけでは、実際取り扱う液状原料を乾燥して粉末製品を得ることは困難であり、事前に乾燥試験を行って様々な試験データを回収し、それに基づき設計を行っている。

4. 運転条件

既に記述したように噴霧乾燥装置で取扱う液状原料の多くは複合材料である。仮に同一の原料であっても粉末製品に要求される目的によって、バインダ、分散剤などの内容物は異なる。また、二種類のアルミナスラリーを同条件で噴霧乾燥を行っても、同じ乾燥製品を得ること出来ない。そのため、事前の噴霧乾燥装置の実機を使った試験を行い、運転条件を変えてその液状原料の特性を把握し、装置設計に反映させる必要がある。同時にこのデータを実際の生産運転の運転条件として活用することが必要不可欠である。以下にアルミナスラリーの乾燥噴霧で、乾燥粒子径と排風温度（一般に製品残留水分値は排風温度に依存する。）を同一にした二種類の噴霧乾燥装置の実液での試験のデータを示す（図7）。図に示されるように同一の運転条件、製品粒子径においても製品水分値が顕著に異なることがわかる。この要因として、液状原料に含まれる内容物の種類、混合比などの違いが乾燥速度に影響を及ぼしていることが考えられる。

これらの違いは、机上の検討では、確認できず、実際に噴霧乾燥を実施しなければ入手できないデータである。



製品粒子径65 μm

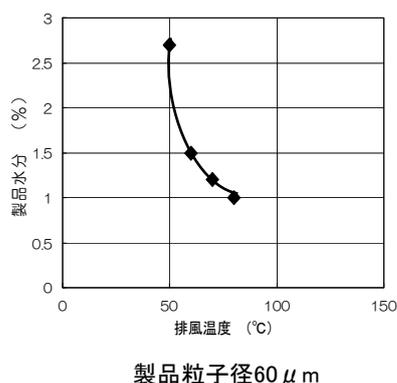


図7：同一液体原料における排風温度と製品水分の関係

5. まとめ

様々な原料を取り扱う装置は、噴霧乾燥装置に限らず、攪拌混合や粉碎、反応装置なども同様であり、机上の計算だけでは設計は出来ない。装置産業の宿命である。実際に取り扱う原料を使って試験運転を行い、様々なデータを回収し、それを基に設計が行われる。

一方、異なる設計のアプローチとして、実機で発生したトラブル対応から得られた経験を設計に生かす方法もある。

まずは机上による検討を実施する前に、個人の経験やトラブル対応からの情報を集める。その時、重要なことは、トラブル対応や個人の経験は暗黙知が多く、日頃、整理して形式知化しておくことが必要である。それらの情報を基に机上の検討を行ったとしてもさらに試験装置での乾燥や粉末の取り扱いの試験結果から得た情報と擦り合わせ、最適な設計を行うことが必要である。

時代は、高純度で高機能を持った粉末製品を噴霧乾燥機に要求している。これらの液状原料は今までに培ってきた経験や実績からの知識では、装置化するのが困難であるため、まったく新しい機器の付加や発想の転換も必要となってくる。そこで重要になることが、現場基点で考え、実際の試験データを活用して考えることである。

参考文献

- 1) 豊橋技術科学大学 鈴木孝司、“液体微粒化の基礎” ILASS-Japan、液体微粒化学会
- 2) 持田隆・荃田、化学装置連載“噴霧乾燥”
- 3) K MASTERS、“SPRAY DRYING HAND BOOK”