技術論文

CFD シミュレーションによる噴霧乾燥機内の ホエイ粉の付着堆積の評価

三塚 翔¹, 高野 真^{1*}, 新川真二郎², 舟橋治幸¹, 大上芳文³, 吉岡孝一郎¹

¹ 雪印メグミルク株式会社ミルクサイエンス研究所

² 雪印ビーンスターク株式会社商品開発部

³ 立命館大学理工学部

Evaluation of Deposition of Whey Powder in Spray Dryer Using CFD Simulation

Sho Mitsuduka¹, Makoto Takano^{1*}, Shinjiro Shinkawa², Haruyuki Funahashi¹,
Yoshifumi Ogami³ and Koichiro Yoshioka¹

¹ MEGMILK SNOW BRAND Co., Ltd. Milk Science Research Institute,
6-1-1 Naebocho Higashi-ku, Sapporo, Hokkaido 065-0043

² Bean Stalk Snow Co., Ltd. Research and Development Department,
1-1-2 Minamidai, Kawagoe, Saitama 350-1165

³ Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University,
1-1-1 Noji-Higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577

Whey powder (WP) production efficiency is influenced by the deposition rate on the wall surface of the chamber during spray drying. However, the accuracy of computer simulation methods for this process is inadequate. In this study, in order to improve the accuracy when simulating WP deposition, we examine the effect of implementing a computational fluid dynamics (CFD) model to vary the drying rate depending on the drop water content and the deposition rate according to the glass transition temperature. Deposition and drying rate models were constructed using the experimental results of a single-drop drying test and differential scanning calorimetry. As water droplets evaporated more slowly during the drying process, the water content of the powder was increased. The simulation prediction that WP was deposited on the top and conical areas of the chamber was consistent with actual measurements. The accumulation of WP was higher than that of skim milk powder (SMP) because of the low glass transition temperature of WP particles. The simulation results for evaporation efficiency, evaporation capacity, evaporation mass flow rate, thermal efficiency, and exhaust temperature obtained using the improved CFD model were highly accurate and consistent with the measurement results. Such high-accuracy CFD simulations can be used to improve the optimization of processing conditions used in the milk powder industry.

(Received Apr. 6, 2020; Accepted Sep. 4, 2020)

Keywords : CFD, simulation, spray drying, milk powder, powder deposition

キーワード : CFD, シミュレーション, 噴霧乾燥, 粉乳, 粉体付着

噴霧乾燥は高温熱風中に牛乳等の固液混合物を噴霧し、急速に乾燥させて粉末を製造する方法である。乳業における噴霧乾燥は、脱脂粉乳やホエイ粉等の粉乳の製造に利用され、伝統的な製造技術といわれる。噴霧乾燥を行う固液混合物や濃縮液の流量、熱風温度や熱風風量等の噴霧乾燥条件の変更は、製造時間の短縮、効率的なエネルギー使用、ランニングコストの低減等のメリットを生む場合がある。一方で、製品水分値の上昇、乾燥機の天板や壁面への付着物の増加等の問題が発生する場合もある。これらの問題は、乾燥機内の熱風の流れ、濃縮液の固形分量、噴霧角度

等の運転条件を操作することで解決できるが、経験や勘に頼る部分も多くあった。

Computational Fluid Dynamics (CFD) は、流体の運動方程式をコンピュータで解析することで、流れ場の速度や温度、圧力等を把握し、さらに流れ場を可視化するシミュレーション技術である。近年、コンピュータの発展に伴い CFD の進歩が著しく、自動車や航空機等の設計に積極的に利用されている。本研究テーマである CFD による噴霧乾燥シミュレーション技術を用いると、装置内部における液滴の飛跡、温度履歴、風の流れ等が解析でき、その結果、

¹ 〒065-0043 北海道札幌市東区苗穂町 6-1-1, ² 〒350-1165 埼玉県川越市南台 1-1-2, ³ 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

*連絡先 (Corresponding author), makoto-takano@meg-snow.com

製品の品質向上や生産効率化を図ることに繋がる。実際、CFDシミュレーションによる乾燥機の天板や壁面への粉体付着^{1)~4)}、ホエイタンパク質の変性率⁵⁾の研究結果が報告されている。しかし、CFDシミュレーションで噴霧対象となる乳製品は、脱脂粉乳^{1)~5)}が多く、ホエイ粉を対象とした報告はない。

よく知られているようにホエイ粉はチーズ製造時に生乳からカードを分離した副産物として排出され、ホエイタンパク質、乳糖およびカルシウムを含んだ重要な乳資源である。ところが、乳糖は粉乳製造において噴霧乾燥機の天板や壁面に対する付着因子のひとつであり⁶⁾、一般的に乳糖を高含有するホエイ粉は付着しやすいとされる。従って、ホエイ粉製造において発生する付着現象を制御するためには、ホエイ粉を対象としたCFDシミュレーションによる付着現象の解析が必要となる。まず初めに、その研究の基礎となる液滴乾燥と付着に関するCFDシミュレーションの概略と過去の研究について以下に述べる。

水滴のような固形分を含まない蒸発化学種のみで構成される液滴を乾燥すると、蒸発化学種は液滴表面の蒸気濃度差を駆動力として連続相へ移動するため、乾燥速度が一定である恒率乾燥となる。乳のような蒸発しない化学種を含む液滴を乾燥すると、液滴含水率の低下に伴い液滴内部の水の移動が制限されることで液滴表面の蒸気濃度が低下するため、乾燥速度が低下して減率乾燥となる。さらに液滴表面の蒸気濃度差がなくなることで、乾燥速度は0となる。このときの含水率は平衡含水率となる。減率乾燥を考慮することによるCFDシミュレーションの精度の向上を目的として、LangrishらはCharacteristic Drying Rate (CDRC)法⁷⁾、ChenらはReaction Engineering (REA)法⁸⁾を適用した研究結果を報告した。CDRC法では、相対乾燥速度比を考慮した液滴の蒸発速度式を示しているが、乾燥速度モデル式および平衡含水率モデル式を求める必要があった。WooらはCDRC法およびREA法を適用したCFDシミュレーションを実施した結果、その計算値は実測値に比べて排風温度が高く、粉体の含水率が低かった⁹⁾。そのため、減率乾燥モデルの精度の向上が必要である。

乾燥機の天板や壁面への粒子の付着は、粒子温度 T とガラス転移温度 T_g の差($T-T_g$)に関連することが知られている¹⁰⁾¹¹⁾。粒子温度がガラス転移温度よりも一定以上高くなったとき、粒子は乾燥機に付着する。一般的に、乳製品の噴霧乾燥は $T-T_g$ を10K~20K以下とするが、Malafronteらは、CFDシミュレーションによる乾燥機への付着は $T-T_g$ が40Kで再現されることを報告した³⁾。 $T-T_g$ が23.3K以上で粒子は付着すると報告されていたが¹²⁾、Patersonらは、粒子の衝突速度を考慮し、 $T-T_g$ が37K以上で付着が増加すると報告した¹³⁾。また、Walmsleyらは、粒子の衝突角度に応じて粒子が反射することを明らかにした¹⁴⁾。ところが、Paterson¹³⁾とWalmsley¹⁴⁾による乾

燥機への付着堆積に関するモデル式には、ガラス転移温度の式を代入する必要がある。ガラス転移温度は含水率に応じて変化するため、KweiらはDSC測定結果より、ポリマーのガラス転移温度の式を求めた¹⁵⁾。脱脂粉乳¹²⁾¹⁶⁾¹⁷⁾およびホエイ粉¹⁷⁾において、ガラス転移温度と含水率の関連は報告されている。一方、本研究の対象となるホエイ粉の付着堆積に関するモデル式に関する報告は見当たらず、その結果、CFDシミュレーションによる乾燥機への付着解析の対象は、脱脂粉乳^{1)~4)}が多く、ホエイ粉に関する報告はない。また、前述のようにホエイ粉を噴霧対象にした報告も見られない。

以上より、本研究はホエイ粉を噴霧対象にし、その付着現象を解明するために、CFDシミュレーション手法を確立し、その精度向上を目的とする。減率乾燥および乾燥機への付着堆積をCFDシミュレーションで再現し、比較検討するために、ホエイ粉だけではなく脱脂粉乳も対象とする。そのために、まず初めにホエイ粉、脱脂粉乳の単一液滴乾燥試験、等温収着試験およびガラス転移温度測定を行い、次にその結果に基づき、減率乾燥および付着堆積をモデル化し、CFDシミュレーションに組み込む。本研究により装置内部における液滴の飛跡、温度履歴、風の流れ等をより正確に把握でき、製品の品質向上や生産効率化に繋げることができる。

実験方法

1. 噴霧乾燥

筆者らは圧力噴霧形式のパイロット噴霧乾燥機にて、脱脂粉乳の溶解液とホエイ粉の溶解液の噴霧乾燥実験を行った。溶解液の噴霧流量および含水率を測定した。その際、サイクロンで捕集した粉乳をサンプルとして回収し、その回収流量および含水率を測定した。含水率は、国際標準化機構の標準試験法に準じ、熱風循環式乾燥法で測定した¹⁸⁾。

さらに、乾燥機入口、チャンバー胴部の上部の壁面、コニカル部、乾燥機出口、乾燥機外部において、乾球温度を測定した。乾燥機入口および乾燥機出口において、湿度および風量も測定した。乾球温度および湿球温度は、シース熱電対(SCHS1-0(K熱電対)、株式会社チノー、東京)を接続したデジタル温度計(TX1002、横河計測株式会社、東京)により測定した。測定点毎に3回測定してその平均を代表値とした。湿度は空気線図における乾球温度および湿球温度に対する値から読み取った。

風量測定はJIS B 8330:2000「送風機の試験及び検査方法」に準拠した¹⁹⁾。動圧および静圧の測定にはL型ピトー管(LK-1S、株式会社岡野製作所、大阪)とポータブル圧力計(testo521-2、Testo SE & Co. KGaA, Lenzkirch)を用い、式(1)より風量 Q [kg/h]を算出した。乾燥機入口のダクトの断面積 A_d は0.0980m²、乾燥機出口の A_d は0.0345m²、ピトー管係数 q は1.00、ピトー管の断面積 A_{pit} は1.11×

10^{-3} m^2 とした。流体の密度 ρ [kg/m^3] は式 (2) から求めた。

$$Q = A_d \times \frac{q \times \sqrt{\frac{2p_g}{\rho}}}{1 + \frac{A_{pit}}{A_d}} \quad \text{式 (1)}$$

$$\rho = \frac{1+H}{0.733+1.241 \times H} \times \frac{273}{273+T} \times \frac{10340 + \frac{p_s}{9.81}}{10340} \quad \text{式 (2)}$$

ここで、 p_g は流体の動圧 [Pa]、 H は絶対湿度 [g/kg (Dry Air)]、 T は温度 [K]、 p_s は流体の静圧 [Pa] である。

粉体粒子径分布はレーザー回折散乱粒度分布測定装置 (MT3300EX II, マイクロトラック・ベル株式会社, 大阪) で測定した。粉体粒子径分布は累積標準正規分布に従うと仮定し、得られた近似直線から篩上累積確率が 0.01~0.99 に対する粉体粒子径分布を得た。

液滴は空隙を持たない密な真球であると仮定し、Lin らの報告を参考として、水の密度を 998 kg/m^3 、乳固形分の密度を 1416 kg/m^3 とし、脱脂粉乳の溶解液とホエイ粉の溶解液の全固形率から液滴の収縮率を計算した²⁰⁾。液滴の粒子径は、粉体の粒子径を収縮率で除した値とした。スプレッドパラメータ r はロジン・ラムラー分布の式(3)に従って求めた。 r は積算質量分率 0.1 毎に計算し、その平均値を代表値とした。

$$r = \frac{\ln(-\ln u)}{\ln(d_p/d_{p,ave})} \quad \text{式 (3)}$$

ここで、 u はロジン・ラムラー分布での篩上積算質量分率、 d_p は液滴径、 $d_{p,ave}$ はロジン・ラムラー分布での平均径である。

2. CFD シミュレーションの計算条件

パイロット噴霧乾燥機の図面に基づき、計算格子作成ソフトウェア (ANSYS GAMBIT, ANSYS Inc., Canonsburg) を用いて作成した 3 次元の計算領域を Fig. 1 に示す。計算は中央演算処理装置 (インテル® Core™ i7-4790 プロセッサー、プロセッサー ベース動作周波数 3.60 GHz、4 コア、Intel Corporation, Santa Clara) を用いて並列計算を行い、各計算には 10 日間を要した。格子数は 5.80×10^5 であり、乱流解析に対応できるよう、壁面からの無次元距離を表す壁座標は 1~362 とした。

CFD シミュレーションには汎用熱流体解析ソフトウェア (ANSYS FLUENT ver17.2, ANSYS Inc., Canonsburg) を使い、気体と液体の二相流の非定常解析とした。ソルバーは圧力基準、精度は倍精度、乱流モデルは RNG $k-\epsilon$ モデル、壁関数は標準壁関数、熱的境界条件は対流伝熱境界条件、非定常時間積分法は 2 次精度陰解法、離散化スキームは SIMPLE とした。

Fig. 1 Spray dryer system

Table 1 Dryer operating conditions and boundary conditions in CFD simulation for comparing constant rate of drying model and decreasing rate of drying model

Air inlet	Flow rate [kg/h]	2730
	Temperature [K]	426
	Humidity [g/kg (Dry Air)]	4.93
Droplet inlet	Flow rate [kg/h]	69.4
	Initial velocity [m/s]	52.0
	Spray angle [°]	76.0
	Initial temperature [K]	314
	Average diameter [μm]	83.6
	Spread parameter [—]	2.10
	Initial moisture content [—]	1.53
Outlet air temperature [K]		370
Outside temperature [K]		307

CFD シミュレーションにおける計算領域の入口と出口の境界条件は、これまでに行ったパイロット噴霧乾燥機の試験データを基に設定した。まず、恒率乾燥モデルまたは減率乾燥モデルを組み込んだ場合の入口の空気と液滴の物性値や、出口の温度等の境界条件を Table 1 に示す。次に減率乾燥モデルおよび付着堆積モデルを組み込んだ場合の境界条件を Table 2 に示す。

液滴の移動の計算には FLUENT の分散相モデルを用い、飛跡計算に Two Way Turbulence Coupling を使用して空気と液滴の運動量の交換を考慮した。また、分散型ランダムウォークモデルを用いることで、瞬間的な乱流の速度変動が粒子飛跡に与える影響を擬似的に再現した。壁境界での液滴の扱いには壁噴流モデルを使用し、壁境界に接

Table 2 Dryer operating conditions and boundary conditions of SMP (Skim Milk Powder) or WP (Whey Powder) for comparing measured data with CFD simulation data

		SMP	WP
Air inlet	Flow rate [kg/h]	2770	2770
	Temperature [K]	421	421
	Humidity [g/kg (Dry Air)]	7.20	5.27
Droplet inlet	Flow rate [kg/h]	68.7	64.5
	Initial velocity [m/s]	57.3	57.3
	Spray angle [°]	76.0	76.0
	Initial temperature [K]	314	322
	Average diameter [μm]	76.3	71.2
	Spread parameter [—]	2.00	1.92
	Initial moisture content [—]	1.62	1.59
Outlet air temperature [K]		366	364
Outside temperature [K]		307	302

触した液滴は接触面に沿って移動する条件とした。粒子径がすべて異なる 20 個の液滴を 18 セット用意し、合計 360 個の粒子を 1 タイムステップごとに粒子入口から注入した。タイムステップは 0.01 秒とした。恒率乾燥モデルまたは減率乾燥モデルを組み込んだ場合の CFD シミュレーションにて、液滴の平均粒子径は 83.6 μm、スプレッドパラメータは 2.10 とした。減率乾燥モデルおよび付着堆積モデルを組み込んだ CFD シミュレーションにて、液滴の平均粒子径は、脱脂粉乳では 76.3 μm、ホエイ粉では 71.2 μm とした。スプレッドパラメータは、脱脂粉乳では 2.00、ホエイ粉では 1.92 とした。

収束判定は次の二つの条件とする。1) 質量、速度、乱流エネルギー、乱流散逸率および化学種の残差が 10^{-3} 以下、エネルギーの残差が 10^{-6} 以下となる。2) 出口境界における風速、温度および湿度の面積平均値が有効数字 4 桁で変化しなくなる。

液滴の比熱は、各成分の質量分率と比熱の積の総和とした²¹⁾。すなわち、ホエイ粉の成分は、タンパク質=12.2% (w/w)、脂肪=5.1% (w/w)、灰分=8.1% (w/w)、炭水化物=74.6% (w/w) とした。脱脂粉乳の成分は、タンパク質=37.8% (w/w)、脂肪=0.6% (w/w)、灰分=8.2% (w/w)、炭水化物=53.4% (w/w) とした。

壁面境界条件はステンレス鋼 SUS304 の壁とし、密度= $7.93 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、比熱= $590 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 、熱伝導度= $16.7 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ とした。

3. CFD シミュレーションに組み込む各種モデル

(1) 減率乾燥モデル

FLUENT の標準設定における液滴質量の交換則は、式 (4) に示す恒率乾燥を対象としており、本研究で必要不可欠な減率乾燥は考慮されていない。一方、液滴含水率の低下に伴い乾燥速度が低下する減率乾燥を組み込んだ式 (5)

が提示されている²²⁾。本研究では式 (5) のモデル式を FLUENT に組み込むことにし、そのために FLUENT のユーザー定義関数を用いた。ユーザー定義関数は FLUENT の標準機能を強化するためにユーザー自身がプログラムする関数であり、境界条件、物性値、反応速度、ソース項等を自由にカスタマイズすることができる。

$$\text{恒率乾燥} \quad \left(\frac{dm}{dt}\right) = A_p M_r k (c_p - c_g) \quad \text{式 (4)}$$

$$\text{減率乾燥} \quad \left(\frac{dm}{dt}\right) = F A_p M_r k (c_p - c_g) \quad \text{式 (5)}$$

ここで、 m は質量、 t は時間、 A_p は液滴の表面積、 M_r は分子量である。式 (4)、式 (5) 中の相対乾燥速度比 F は式 (6)～式 (8)、物質移動係数 k は式 (9)～式 (11)、液滴表面の蒸気モル濃度 c_p は式 (12)、流体中の蒸気モル濃度 c_g は式 (13) で与えられ、質量の時間微分は式 (14) と定義した²²⁾²³⁾。

$$x_c \leq x \text{ のとき} \quad F = 1 \quad \text{式 (6)}$$

$$x_e < x < x_c \text{ のとき} \quad F = \left(\frac{x - x_e}{x_c - x_e}\right)^n \quad \text{式 (7)}$$

$$x \leq x_e \text{ のとき} \quad F = 0 \quad \text{式 (8)}$$

$$k = \frac{D(2.0 + 0.6 Re^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}})}{d_p} \quad \text{式 (9)}$$

$$Re = \frac{\rho |v_p - v_g| d_p}{\mu} \quad \text{式 (10)}$$

$$Sc = \frac{\mu}{D\rho} \quad \text{式 (11)}$$

$$c_p = \frac{p_p}{RT_p} \quad \text{式 (12)}$$

$$c_g = \frac{X_a p_a}{RT_a} \quad \text{式 (13)}$$

$$\left(\frac{dm}{dt}\right) = F \left(\frac{dm}{dt}\right)_0 \quad \text{式 (14)}$$

ここで、 x_c は限界含水率、 x は含水率、 x_e は平衡含水率、 n は乗数、 D は流体中の蒸気の拡散係数、 Re は相対レイノルズ数、 Sc はシュミット数、 d_p は液滴径、 ρ は流体の密度、 v_p は液滴の速度、 v_g は流体の速度、 μ は流体の粘度、 R は気体定数、 T_p は液滴の温度、 p_p は T_p における飽和水蒸気圧、 X_a は流体中の蒸気モル分率、 p_a は流体中の蒸気の圧力、 T_a は流体中の蒸気の温度である。

初めに脱脂粉乳およびホエイ粉における乾燥特性曲線を取得するために、ガラスフィラメント法による単一液滴乾燥試験を行った。この実験はガラスフィラメントの先端にシリンジを用いて直径 1 mm～2 mm の乳液滴を形成し、液滴の下側から熱風を当てて乾燥させ、その重量を電子天秤で経時的に測定する方法である²⁴⁾²⁵⁾。

この実験の結果、乾燥速度は初発の含水率である 1.50 から既に低下し始めていることから、限界含水率 x_c は 1.50 とした。表計算ソフト (Excel 2010, Microsoft Corporation, Redmond) のソルバー機能を用い、最小二乗法にて山本の報告にある式 (15) で表される曲線を実測値に基づく含水率基準の乾燥特性曲線に近似させて、フィッティングパラメータ a , b , c を求めた²⁶⁾。また、最小二乗法にて式 (16) を微分して得られる式 (16) の曲線と式 (14) で表される曲線を近似させることで式 (7) の乗数 n を算出した。

$$x = \exp\left(\frac{b+act}{1+at}\right) \quad \text{式 (15)}$$

$$\left(\frac{dx}{dt}\right) = \frac{a(c-b)}{(1+at)^2} \exp\left(\frac{b+act}{1+at}\right) \quad \text{式 (16)}$$

次に等温収着試験により以下に述べる各品目における平衡含水率曲線を取得した²⁷⁾²⁸⁾。すなわち、アルミパウチ (340 mm×240 mm) の中に飽和塩 (フッ化セシウム、塩化リチウム、塩化マグネシウム、硝酸マグネシウム、塩化ナトリウム、塩化カリウム、臭化リチウム、酢酸カリウム) を入れて相対湿度が平衡に達するまで保存し、温度を 293 K, 313 K, 333 K, 353 K に変更した際の粉体の平衡含水率を測定した。水分活性 a_w 基準の平衡含水率 x_e に対し、最小二乗法にて式 (17) で表される Modified Halsey モデルに近似させて、フィッティングパラメータ d , e , f を求めた²⁷⁾²⁹⁾。

$$x_e = \left[-\frac{\exp(d+eT)}{\ln a_w} \right]^{\frac{1}{f}} \quad \text{式 (17)}$$

ここで、 T は粒子温度である。

(2) 付着堆積モデル

示差走査熱量測定装置 (DSC) (DSC 1, Mettler-Toledo International Inc., Greifensee) を用いて、脱脂粉乳およびホエイ粉のガラス転移温度を測定した¹⁷⁾。すなわち 10 mg~15 mg の試料をアルミニウム製標準サンプルパン (容量 40 μ L) に入れ、昇降温速度を 5 K/min で、温度を 293 K, 393 K, 293 K, 393 K と変化させ、解析ソフト (STARe, Mettler-Toledo International Inc., Greifensee) でガラス転移温度を測定した。ガラス転移温度は、1 次微分曲線の極小値とした。含水率 x 基準のガラス転移温度 T_g に対し、最小二乗法にて式 (18) で表される Kwei モデルに近似させて、フィッティングパラメータ g , h , i を求めた¹⁵⁾。

$$T_g = \frac{g-135hx}{hx+1} + \frac{10000ix}{(1+x)^2} \quad \text{式 (18)}$$

さらに、Paterson らの付着判定率 w に関する経験式 (式 (19)~式 (21)) と、Walmsley らの粒子が付着する衝突角度 θ に関する経験式 (式 (22), 式 (23)) を付着堆積モデルに採用した¹³⁾¹⁴⁾。 w は粒子の付着判定の確率に関する式

であり、 $w=0$ のときに壁面に衝突した全粒子は付着せず、 $w=100$ のときに壁面に衝突した全粒子は付着する。 θ は粒子が付着しない角度に関する式であり、壁面に衝突した粒子の角度が θ 以下では付着しない。

$$w \leq 0 \text{ のとき} \quad w = 0 \quad \text{式 (19)}$$

$$0 < w < 100 \text{ のとき} \quad w = 3.00 \times (T - T_g) - 112 \quad \text{式 (20)}$$

$$100 \leq w \text{ のとき} \quad w = 100 \quad \text{式 (21)}$$

$$\theta \leq 0 \text{ のとき} \quad \theta = 0 \quad \text{式 (22)}$$

$$0 < \theta \text{ のとき} \quad \theta = 90.0(1 - \exp(-17.6(T - T_g - 44.0))) \quad \text{式 (23)}$$

(3) 噴霧乾燥のパラメータ

蒸発効率 η_e は、最大蒸発量を満たす熱量当たりの蒸発に要した熱量の割合とした³⁰⁾。最大蒸発量を満たす熱量は、乾燥機入口の絶対湿度が飽和状態となる温度 T_s と乾燥機入口の温度 T_i の差から求め、蒸発に要した熱量は、乾燥機出口の温度 T_o と乾燥機入口の温度 T_i の差から求めた。

$$\eta_e = \left(\frac{T_i - T_o}{T_i - T_s} \right) \times 100 \quad \text{式 (24)}$$

熱効率 η_t は、流入総熱量当たりの蒸発に要した熱量の割合とした。流入総熱量は、乾燥機入口の風量 Q_i と比エンタルピ I の積とし、蒸発に要した熱量は、蒸発速度 dm/dt と蒸発潜熱 j の積とした。

$$\eta_t = \frac{\frac{dm}{dt} \times j}{Q_i \times I} \times 100 \quad \text{式 (25)}$$

蒸発容量 E は、チャンバー容量 V 当たりの蒸発速度 dm/dt とした。 V は 13.8 m³ とした。

$$E = \frac{dm/dt}{V} \quad \text{式 (26)}$$

付着率 y は、噴霧した固形量と回収した固形量の差の割合とした。

$$y = 100 - \frac{\frac{f_p}{1+x_p}}{\frac{f_i}{1+x_i}} \times 100 \quad \text{式 (27)}$$

ここで、 f_i は噴霧流量、 x_i は溶解液の含水率、 f_p は粉乳の回収流量、 x_p は回収した粉乳の含水率である。

蒸発流量 f_e は、乾燥機出口の水分流量と乾燥機入口の水分流量の差とした。

$$f_e = Q_o \times \frac{1+H_o}{H_o} - Q_i \times \frac{1+H_i}{H_i} \quad \text{式 (28)}$$

ここで、 Q_o は乾燥機出口の風量、 H_o は乾燥機出口の絶対湿度、 Q_i は乾燥機入口の風量、 H_i は乾燥機入口の絶対湿度である。

粒子のガラス転移温度分布は、各粒子のガラス転移温度を篩下累積分布で示した。対象の粒子は、チャンバー胴部の上部、チャンバー胴部の下部、コンカルに位置した粒子とした。

実 験 結 果

1. 減率乾燥モデルの構築

前述のように単一液滴乾燥試験を行い、脱脂粉乳およびホエイ粉の溶解液について含水率の時間変化を測定した。含水率の時間変化は山本の式(15)にフィッティングし、含水率の近似式を得た²⁶⁾。その結果得られた含水率の実験値と近似式を Fig. 2 に示す。なお、図中の SMP は脱脂粉乳を、WP はホエイ粉を示す。両方とも含水率の初期値が 1.5 であるが、全体的に脱脂粉乳は、ホエイ粉と比較して含水率が低下していたため、脱脂粉乳の方が乾燥速度は速いことが分かる。

ちなみに、脱脂粉乳およびホエイ粉における含水率の近似式は以下の通りである。

$$\text{脱脂粉乳 } x = \exp\left(\frac{37.6 - 0.445t}{100 + 0.253t}\right) \quad \text{式 (29)}$$

$$\text{ホエイ粉 } x = \exp\left(\frac{39.3 - 0.398t}{100 + 0.349t}\right) \quad \text{式 (30)}$$

含水率の微分式を近似した結果より、脱脂粉乳とホエイ

Fig. 2 Moisture content as a function of time for comparison of model fitting with experimental data on SMP (Skim Milk Powder) or WP (Whey Powder)

粉の相対乾燥速度比の式 (6) は以下の通りとなった。

$$\text{脱脂粉乳 } F = \left(\frac{x - x_e}{x_c - x_e}\right)^{1.77} \quad \text{式 (31)}$$

$$\text{ホエイ粉 } F = \left(\frac{x - x_e}{x_c - x_e}\right)^{1.86} \quad \text{式 (32)}$$

次に等温吸着試験を行い、脱脂粉乳およびホエイ粉について、平衡含水率と相対湿度の関係を調べた。modified Halsey の式 (17) にて、平衡含水率の近似式を得た²⁷⁾²⁹⁾。その結果得られた平衡含水率の実験値と近似式を Fig. 3 に示す。脱脂粉乳 (SMP) は、ホエイ粉 (WP) と比較して平衡含水率が高かった。Fan らは、乳糖が平衡含水率に影響することを明らかにしており³¹⁾、SMP の乳糖は 53.4% (w/w)、WP の乳糖は 74.6% (w/w) であり、SMP は WP と比較して乳糖が少なかった。

ちなみに、脱脂粉乳およびホエイ粉における平衡含水率の近似式は以下の通りである。

$$\text{脱脂粉乳 } x_e = \left[-\frac{\exp(-4.99 - 5.61 \times 10^{-3} T)}{\ln a_w} \right]^{\frac{1}{0.96}} \quad \text{式 (33)}$$

$$\text{ホエイ粉 } x_e = \left[-\frac{\exp(-3.17 - 4.08 \times 10^{-5} T)}{\ln a_w} \right]^{\frac{1}{0.96}} \quad \text{式 (34)}$$

以上の結果より、乾燥速度の式と平衡含水率の式を CDRC へ適用し、CFD シミュレーションのための減率乾燥モデルが構築できた。

2. 付着堆積モデルの構築

前述のように脱脂粉乳およびホエイ粉を DSC で分析し

Fig. 3 Equilibrium moisture content as a function of relative humidity for comparison of model fitting with experimental data on SMP (Skim Milk Powder) or WP (Whey Powder)

Fig. 4 Glass transition temperature as a function of moisture content for comparison of model fitting with experimental data on SMP (Skim Milk Powder) or WP (Whey Powder)

て、ガラス転移温度と含水率との関係を測定した。これらのデータを用いて Kwei の式 (18) によるガラス転移温度の近似式を得た¹⁵⁾。その結果得られたガラス転移温度の実験値と近似式を Fig. 4 に示す。脱脂粉乳 (SMP) は、ホエイ粉 (WP) と比較して含水率 0.01 以上の領域でガラス転移温度が高く、含水率 0.01 以下の領域でガラス転移温度が低かった。ちなみに、脱脂粉乳およびホエイ粉におけるガラス転移温度の近似式は以下の通りであった。

$$\text{脱脂粉乳 } T_g = \frac{341.59x^3 + 230.00x^2 + 727.75x + 356.89}{2.4726x^3 + 5.9452x^2 + 4.4726x + 1.0000} \quad \text{式 (35)}$$

$$\text{ホエイ粉 } T_g = \frac{159.25x^3 + 518.17x^2 + 247.64x + 37.143}{1.1528x^3 + 2.4055x^2 + 1.3528x + 0.10000} \quad \text{式 (36)}$$

脱脂粉乳の近似式は Vuataz¹⁶⁾ および Schuck¹⁷⁾ の値と差がなかったが、ホエイ粉の近似式は Schuck¹⁷⁾ の値と差があった。ホエイ粉は、チーズの製法および処理工程により、成分組成や pH が異なる³²⁾。ガラス転移温度と成分組成 (タンパク質、カルシウム、乳酸) との関連が報告されている^{33)~35)}。Schuck¹⁷⁾ のホエイ粉の成分は、ホエイタンパク質 = 13.2% (w/w)、乳糖 = 78.9% (w/w) であったが、灰分や脂肪は示されておらず、ガラス転移温度の原因は明らかでない。

以上の結果より、ガラス転移温度の式 (35) および式 (36) は Paterson の付着判定式 (式 (20)) および Walmsley の付着式 (式 (22)) に組み込むことができ、CFD シミュレーション

Table 3 Comparison of measured data and CFD simulation data using constant rate of drying model or decreasing rate of drying model

	Outlet temperature [K]	Evaporation mass flow rate [kg/h]	Moisture content [-]
Measured	370	41.7	1.05×10^{-2}
Constant Rate of Drying model	369	42.0	9.90×10^{-6}
Decreasing rate of drying model	370	41.8	9.32×10^{-3}

のための付着堆積モデルを構築できた¹³⁾¹⁴⁾。

3. 恒率乾燥モデルと減率乾燥モデルの比較

恒率乾燥モデルまたは減率乾燥モデルを組み込んだ CFD シミュレーションを実施し、その結果を Table 3 に示す。含水率は、実測値が 1.05×10^{-2} に対し、恒率乾燥での CFD シミュレーションでは 9.90×10^{-6} 、減率乾燥での CFD シミュレーションでは 9.32×10^{-3} であった。このように減率乾燥モデルを考慮しない CFD シミュレーションでは、液滴水分のほぼ全量 that 出口に到達するまでに蒸発してしまい、実測値と大きく異なっていた。一方、減率乾燥モデルを導入した場合は、液滴含水率の低下に伴い水の蒸発が抑制され、その結果、実測値と近い値となり本研究で構築した減率乾燥モデルの計算精度が確認できた。

CFD シミュレーションで得られた排風温度は、実測値の 370 K に対し、恒率乾燥モデルでは 369 K、減率乾燥モデルでは 370 K であり、どちらの乾燥モデルもほとんど排風温度に影響しなかった。CFD シミュレーションで得られた蒸発流量は、実測値の 41.7 kg/h に対し、恒率乾燥モデルでは 42.0 kg/h、減率乾燥モデルでは 41.8 kg/h であり、どちらの乾燥モデルも蒸発流量にほとんど影響しなかった。

以上より、本研究で構築した減率乾燥モデルを導入した CFD シミュレーションでは、含水率の計算値は恒率乾燥の場合よりも実現象と非常に良い一致を見せた。排風温度および蒸発流量の計算値は、恒率乾燥でも減率乾燥でも実現象と良い一致を見せた。したがって、本研究で構築した減率乾燥を導入した CFD シミュレーションは、含水率、排風温度、蒸発流量のいずれの場合についても、精度良く解析できることが明らかとなった。

4. 付着堆積モデルによる CFD シミュレーション

乾燥機の天板や壁面への粒子の付着は、粒子温度 T とガラス転移温度 T_g の差 ($T - T_g$) に関連することが知られている。ところが、ガラス転移温度は含水率に応じて変化するため、付着解析には含水率や温度の整合性が重要である。これまで示したように、今回の CFD シミュレーションは実現象を十分に反映しており、乾燥機の天板や壁面への粒子の付着も解析できる可能性があり、それを検証した。

Table 4 Comparison of measured data and CFD simulation data on spray drying of SMP (Skim Milk Powder) or WP (Whey Powder)

Evaluation items	SMP		WP	
	Measured	CFD	Measured	CFD
Evaporation efficiency [% (w/w)]	39.8	39.8	39.6	39.5
Evaporation capacity [kg/h/m ³]	3.0	3.0	3.1	3.0
Evaporation mass flow rate [kg/h]	41.9	41.1	42.3	41.8
Thermal efficiency [% (w/w)]	20.6	19.9	21.5	20.9
Deposition yield [% (w/w)]	6.1	4.8	11.3	8.6
Inlet air temperature [K]	421	421	421	421
Vertical wall (upper) temperature [K]	372	371	370	369
Conical air temperature [K]	371	370	368	368
Outlet air temperature [K]	366	366	364	364

減率乾燥モデルおよび付着堆積モデルを組み込んだ CFD シミュレーションを実施し、その解析結果を Fig. 5 および Table 4 に示す。Fig. 5 より、脱脂粉乳 (SMP) およびホエイ粉 (WP) において、高温かつ高速の空気領域は噴霧口から直下方向に分布しており、特に胴部の上部の壁面における上方への空気の流れは実測時に目視で確認した。Table 4 より、SMP および WP において、蒸発効率、蒸発容量、蒸発流量、熱効率、乾燥機入口の空気温度、胴部の上部の壁面温度、コンカル部の空気温度および排風温度は、CFD シミュレーションと実測値が良く一致しており、予想通り十分に整合していることが分かる。

CFD シミュレーションにおける付着堆積結果を Fig. 6 に示す。壁面に付着した粒子の実測位置は、脱脂粉乳 (SMP) ではチャンバー胴部の上側、ホエイ粉 (WP) ではチャンバー胴部の上側とコンカル部である。CFD シミュレーションにて、脱脂粉乳の付着率は、天井部=0.0% (w/w)、チャンバー胴部の上部=3.9% (w/w)、チャンバー胴部の下部=0.4% (w/w)、コンカル部=0.5% (w/w) であった。ホエイ粉の付着率は、天井部=0.1% (w/w)、チャンバー胴部の上部=4.7% (w/w)、チャンバー胴部の下部=0.8% (w/w)、コンカル部=3.0% (w/w) であった。CFD シミュレーションの結果を実測と比較したところ、脱脂粉乳やホエイ粉の付着位置は一致していた。脱脂粉乳の総付着率は、実測値では 6.1% (w/w)、CFD シミュレーションでは 4.8% (w/w) であった。一方、ホエイ粉の総付

着率は、実測値では 11.3% (w/w)、CFD シミュレーションでは 8.6% (w/w) であり、CFD シミュレーションの方が若干過少に見積もられた。

CFD シミュレーションのための付着堆積モデルは、Paterson の付着判定式 (式 (19)~式 (21)) および Walmsley の付着式 (式 (22), 式 (23)) にガラス転移温度の式を組み込んで構築している。実測で見られたチャンバー胴部の上部やコンカル部への粒子の付着の原因を明らかにするために、CFD シミュレーションにより粒子のガラス転移温度分布を解析した結果を Fig. 7 に示す。縦軸の Particle rate は各粒子のガラス転移温度を篩下累積分布で示した。対象の粒子は、チャンバー胴部の上部、チャンバー胴部の下部、コンカル部とした。

チャンバー胴部の上部 (Fig. 7 (A)) にてガラス転移温度が 340 K 以下の粒子は、ホエイ粉 (WP) の方が脱脂粉乳 (SMP) よりも多かった。特に、ガラス転移温度が 320 K 以下の粒子の割合は、ホエイ粉は 46% (w/w)、脱脂粉乳は 34% (w/w) であった。このようにガラス転移温度が低い粒子が存在したため、粒子は“付着”と判定されていた。

次に、コンカル部 (Fig. 7 (C)) にてガラス転移温度が 340 K 以下の粒子は、ホエイ粉の方が脱脂粉乳よりも多かった。特に、ガラス転移温度が 320 K 以下の粒子の割合は、ホエイ粉は 22% (w/w)、脱脂粉乳は 3% (w/w) であった。このようにホエイ粉の方が脱脂粉乳よりもガラス転移温度の低い粒子が多いため、“付着”と判定された粒子が増加し、ホエイ粉はコンカル部へ付着していた。同様の傾向はチャンバー胴部の下部 (Fig. 7 (B)) でもみられ、ホエイ粉の方が脱脂粉乳よりもチャンバー胴部の下部へより多く付着していた。この CFD シミュレーションの付着機構によって、実測でもホエイ粉の方が脱脂粉乳よりも多く付着したと考えられる。

考 察

本研究の CFD シミュレーション結果は、噴霧乾燥の粉体付着率が実測値と非常によく整合しており、高い精度で再現できたと考える。つまり、山本式で近似した乾燥速度式²⁶⁾、modified Halsey の式で近似した平衡含水率式²⁷⁾²⁹⁾を CDRC 法に導入することで、乳製品の噴霧乾燥における CFD シミュレーションは有用なツールとなり得る。

一方、本ツールをより高精度なものにするためには次のように考察できる。

Kwei の式 (17) に近似したガラス転移温度の含水率変化¹⁷⁾、Paterson の付着判定式 (式 (19)~式 (21))、Walmsley の付着式 (式 (22), 式 (23)) を組み合わせた付着堆積モデルは¹³⁾¹⁴⁾、乳製品の噴霧乾燥における付着に適した有用なモデルと考える。しかし、このモデルではホエイ粉の付着は実測値よりも過少に見積もられた。これは脱脂粉乳を対象とした Paterson の付着判定式を参考としたためと推定

Fig. 5 Air temperature and velocity magnitude inside the chamber in CFD simulation on spray drying of SMP (Skim Milk Powder) or WP (Whey Powder)

	Experiment results		Simulation results				Deposit rate $\times 10^{-3}$ (kg/m ²)
	WP	SMP	WP	SMP	WP	SMP	
Top board			0.1% (w/w)	0.0% (w/w)			
Vertical Wall (upper)			4.7% (w/w)	3.9% (w/w)			
Vertical Wall (lower)			0.8% (w/w)	0.4% (w/w)			
Conical wall			3.0% (w/w)	0.5% (w/w)			
Total	11.3% (w/w)	6.1% (w/w)	8.5% (w/w)	4.8% (w/w)			

Fig. 6 Deposition on the chamber in experiment or CFD simulation on spray drying of SMP (Skim Milk Powder) or WP (Whey Powder)

した¹³⁾。付着率の更なる再現性の精度の向上には、より精度の良いホエイ粉の付着判定式が必要と考える。

一方、Murti らの報告によると、粒子が壁面に衝突する速度が大きいほど壁面に接触する時間が短くなり、結果的に付着が少なくなる傾向にあった³⁶⁾。Paterson の Particle-Gun 実験では粒子の衝突速度が 20 m/s であるのに対し¹²⁾、CFD シミュレーション対象の噴霧乾燥では 20 m/s 以下である。そこで、粒子の衝突速度も踏まえることで、粉体の壁面付着の精度はさらに改善され则认为。付着堆積モデルより、付着増加は、粒子温度や粒子含水率の上昇、ガラス転移しやすい粒子の温度領域に起因するとされる。今

回の結果より、ホエイ粉の方が脱脂粉乳よりも多く付着しており、それは壁面衝突時の粒子温度がホエイ粉の方が相対的にガラス転移しやすい温度領域であったことが原因と考える。壁面付着の低減に向けて、CFD シミュレーションにて風の流れ等の乾燥条件の変更³⁷⁾による壁面衝突時の粒子含水率や粒子温度の低下、ホエイ成分の変更³⁸⁾によるホエイ粉の平衡含水率や乾燥速度の向上、噴霧乾燥機の形状や材質等の変更³⁹⁾による壁面温度の低下や壁面衝突の低減を検討していく必要がある。

Fig. 7 Effect of particle location in chamber on glass transition temperature of particle for SMP (Skim Milk Powder) or WP (Whey Powder)

A, Vertical wall (upper); B, Vertical wall (lower); C, Conical wall.

要 約

ホエイ粉の噴霧乾燥機内壁に対する付着現象を対象とし、1) CFD シミュレーションの確立、2) CFD シミュレーションの精度向上、3) ホエイ粉の付着現象の解明に関する検討結果を報告した。

まず、CFD シミュレーションの確立に向けて、液滴含水率の低下に伴う乾燥速度の低下（減率乾燥）、ガラス転移温度に応じた乾燥機への付着堆積を CFD シミュレーション

上に再現する必要があった。脱脂粉乳およびホエイ粉を対象とした単一液滴乾燥試験および DSC の結果に基づき、減率乾燥および付着堆積をモデル化した。

次に、乳製品の噴霧乾燥における CFD シミュレーション精度の向上を検討した。CFD シミュレーションにより、減率乾燥を考慮しない計算では液滴水分のほぼ全量が出口に到達するまでに蒸発するのに対し、減率乾燥を導入したモデルでは液滴含水率の低下に伴い水の蒸発が抑制されることが明らかとなった。付着堆積モデルを組み込むこと

で、ホエイ粉の付着位置がチャンバー胴部の上部やコンカル部で観測され、実現象が再現されていた。つまり、Kweiの式に近似したガラス転移温度の含水率変化、Patersonの付着判定式、Walmsleyの付着式を組み合わせた付着堆積モデルは、脱脂粉乳だけではなく、ホエイ粉の噴霧乾燥における付着に適した有用なモデルであった。また、実測値との比較において、蒸発効率、蒸発容量、蒸発流量、熱効率、乾燥機入口の空気温度、胴部の上部の壁面温度、コンカル部の空気温度および排風温度に整合性を確認し、CFDシミュレーションは実際の噴霧乾燥の応答傾向を高い精度で再現できた。

最後に、ホエイ粉の噴霧乾燥における付着現象の機構を検討した。その結果、ホエイ粉の方が脱脂粉乳よりもガラス転移温度の低い粒子割合が高いため、“付着”と判定された粒子が増加することが分かった。

以上のように、減率乾燥および付着堆積のモデルを導入することにより、脱脂粉乳だけではなく、ホエイ粉の噴霧乾燥を対象としたCFDシミュレーション精度が向上した。ホエイ粉の付着はガラス転移温度の低い粒子の影響であることが明らかとなった。

記 号

A_d	=ダクトの断面積 [m ²]
A_p	=液滴の表面積 [m ²]
A_{pit}	=ピトー管の断面積 [m ²]
a_w	=水分活性 [-]
c_g	=流体中の蒸気モル濃度 [mol/m ³]
c_p	=液滴表面の蒸気モル濃度 [mol/m ³]
D	=流体中の蒸気の拡散係数 [m ² /s]
d_p	=液滴径 [m]
$d_{p,ave}$	=ロジン・ラムラー分布での平均径 [m]
E	=蒸発容量 [kg/m ³ /h]
F	=相対乾燥速度比 [-]
f_e	=蒸発流量 [kg/h]
f_i	=噴霧流量 [kg/h]
f_p	=粉乳の回収流量 [kg/h]
H	=絶対湿度 [g/kg (Dry Air)]
H_i	=乾燥機入口の絶対湿度 [g/kg (Dry Air)]
H_o	=乾燥機出口の絶対湿度 [g/kg (Dry Air)]
I	=乾燥機入口の比エンタルピー [J/kg]
j	=蒸発潜熱 [J/kg]
k	=物質移動係数 [m/s]
m	=質量 [kg]
M_r	=分子量 [kg/mol]
p_a	=流体中の蒸気の圧力 [Pa]
p_g	=流体の動圧 [Pa]
p_s	=流体の静圧 [Pa]
p_p	=液滴の温度 T_p における飽和水蒸気圧 [Pa]

Q	=風量 [kg/h]
Q_i	=乾燥機入口の風量 [kg/h]
Q_o	=乾燥機出口の風量 [kg/h]
q	=ピトー管係数 [-]
R	=気体定数 [J/(K・mol)]
Re	=相対レイノルズ数 [-]
r	=スプレッドパラメータ [-]
Sc	=シュミット数 [-]
t	=時間 [s]
T	=温度 [K]
T_a	=流体中の蒸気の温度 [K]
T_g	=ガラス転移温度 [K]
T_i	=乾燥機入口の温度 [K]
T_o	=乾燥機出口の温度 [K]
T_p	=液滴の温度 [K]
T_s	=乾燥機入口の絶対湿度が飽和状態となる温度 [K]
u	=ロジン・ラムラー分布での篩上積算質量分率 [-]
V	=チャンバー容量 [m ³]
v_g	=流体の速度 [m/s]
v_p	=液滴の速度 [m/s]
w	=付着判定率 [% (W/W)]
X_a	=流体中の蒸気モル分率 [-]
x	=含水率 [-]
x_c	=限界含水率 [-]
x_e	=平衡含水率 [-]
x_i	=溶解液の含水率 [-]
x_p	=回収した粉乳の含水率 [-]
y	=付着率 [% (W/W)]
η_e	=蒸発効率 [% (W/W)]
η_t	=熱効率 [% (W/W)]
θ	=衝突角度 [°]
μ	=流体の粘度 [kg/(m・s)]
ρ	=流体の密度 [kg/m ³]

文 献

- 1) Keshani, S., Montazeri, M.H., Daud, W.R.W., and Nourouzi, M.M. (2015). CFD modeling of air flow on wall deposition in different spray dryer geometries. *Drying Technol.*, **33**, 784–795.
- 2) Sadripour, M., Rahimi, A., and Hatamipour, M.S. (2012). Experimental study and CFD modeling of wall deposition in a spray dryer. *Drying Technol.*, **30**, 574–582.
- 3) Malafronte, L., Ahrné, L., Innings, F., Jongsma, A., and Rasmuson, A. (2015). Prediction of regions of coalescence and agglomeration along a spray dryer-Application to skim milk powder. *Chem. Eng. Res. Des.*, **104**, 703–712.
- 4) Jin, Y. and Chen, X.D. (2011). Entropy production during the drying process of milk droplets in an industrial spray dryer. *Int. J. Therm. Sci.*, **50**, 615–625.
- 5) Jaskulski, M., Atuonwu, J.C., Tran, T.T.H., Stapley, A.G.F., and Tsotsas, E. (2017). Predictive CFD modeling of whey protein denaturation in skim milk spray drying powder

- production. *Adv. Powder Technol.*, **28**, 3140–3147.
- 6) Hogan, S. A., O'Callaghan, D. J., and Bloore, C. G. (2009). Application of fluidised bed stickiness apparatus to dairy powder production. *Milchwissenschaft*, **64**, 308–311.
- 7) Langrish, T. A. G. and Kockel, T. K. (2001). The assessment of a characteristic drying curve for milk powder for use in computational fluid dynamics modelling. *Chem. Eng. J.*, **84**, 69–74.
- 8) Chen, X. D. (2008). The basics of a reaction engineering approach to modeling air-drying of small droplets or thin-layer materials. *Drying Technol.*, **26**, 627–639.
- 9) Woo, M. W., Daud, W. R. W., Mujumdar, A. S., Wu, Z., Talib, M. Z. M., and Tasirin, S. M. (2008). CFD evaluation of droplet drying models in a spray dryer fitted with a rotary atomizer. *Drying Tech.*, **26**, 1180–1198.
- 10) Keshani, S., Daud, W. R. W., Nourouzi, M. M., Namvar, F., and Ghasemi, M. (2015). Spray drying: An overview on wall deposition, process and modeling. *J. Food Eng.*, **146**, 152–162.
- 11) Foster, K. D., Bronlund, J. E., and Paterson, A. H. J. (2006). Glass transition related cohesion of amorphous sugar powders. *J. Food Eng.*, **77**, 997–1006.
- 12) Ozmen, L. and Langrish, T. A. G. (2002). Comparison of glass transition temperature and sticky point temperature for skim milk powder. *Drying Tech.*, **20** (6), 1177–1192.
- 13) Paterson, A. H., Bronlund, J. E., Zuo, J. Y., and Chatterjee, R. (2007). Analysis of particle-gun-derived dairy powder stickiness curves. *Int. Dairy J.*, **17**, 860–865.
- 14) Walmsley, T. G., Walmsley, M. R. W., Atkins, M. J., Neale, J. R., and Addenbrooke, D. M. (2013). Critical impact angle for mitigating deposition of skim milk powder on tubes in cross-flow. Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning - 2013, Budapest, pp. 272–278.
- 15) Kwei, T. K. (1984). The effect of hydrogen bonding on the glass transition temperature of polymer mixtures. *J. Polym. Sci.: Polymer Letters*, **22**, 307–313.
- 16) Vuataz, G. (2002). The phase diagram of milk : a new tool for optimising the drying process. *Lait*, **82**, 485–500.
- 17) Schuck, P., Blanchard, E., Dolivet, A., Méjean, S., Onillon, E., and Eantet, R. (2005). Water activity and glass transition in dairy ingredients. *Lait*, **85**, 295–304.
- 18) International Organization for Standardization (2004). Dried milk - Determination of moisture content (Reference method). ISO 5537|IDF26.
- 19) 日本規格協会 (2001). 「送風機の試験及び検査方法」, 日本規格協会, 東京.
- 20) Lin, S. X. Q. and Chen, X. D. (2004). Changes in milk droplet diameter during drying under constant drying conditions investigated using the glass-filament method. *Food Bioprod. Process.*, **82** (3), 213–218.
- 21) Singh, R. P. (2006). Chapter 5 heating and cooling processes for foods, In “Handbook of Food Engineering,” ed. by D. R. Heldman, D. B. Lund and C. Sabllov, CRC Press, Florida, pp. 397–426.
- 22) Jaskulski, M., Atuonwu, J. C., Tran, T. T. H., Stapley, A. G. F., and Tsotsas, E. (2017). Predictive CFD modeling of whey protein denaturation in skim milk spray drying powder production. *Adv. Powder Technol.*, **28**, 3140–3147.
- 23) Yuan, W. (1995). Design of staged through-circulation drying with air reversals. *Chem. Eng. Sci.*, **50**, 99–104.
- 24) Walton, D. E. (2004). The evaporation of water droplets. A single droplet drying experiment. *Drying Technol.*, **22**, 431–456.
- 25) Fu, N., Woo, M. W., Selomulya, C., Chen, X. D., Patel, K., Schuck, P., and Jeantet, R. (2012). Drying kinetics of skim milk with 50 wt.% initial solids. *J. Food Eng.*, **109**, 701–711.
- 26) 山本修一, 吉本則子, 藤井幸江 (2012). 塩などの結晶性物質を含む食品アモルファスマトリクスの乾燥, 「助成研究報告集 = The Salt Science Research Foundation annual research report」, ソルトサイエンス研究財団, 東京, pp. 201–207.
- 27) Iglesias, H. and Chirife, J. (1976). Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material. *Int. J. Food Sci. Technol.*, **11**, 109–116.
- 28) Shrestha, A. K., Howes, T., Adhikari B. P., Wood, B. J., and Bhandari, B. R. (2007). Effect of protein concentration on the surface composition, water sorption and glass transition temperature of spray-dried skim milk powders. *Food Chem.*, **104**, 1436–1444.
- 29) Ajibola, O. O., Aviara, N. A., and Abodunrin, V. K. (2005). Moisture sorption equilibrium and thermodynamic properties of palm kernel. *Int. Agrophys.*, **19**, 273–283.
- 30) Filková, I. and Mujumdar, A. S. (1995). Industrial spray drying systems, In “Handbook of industrial drying second edition,” ed. by A. S. Mujumdar, Marcel Dekker Inc., New York, pp. 263–308.
- 31) Fan, F., Mou, T., Nurhadi, B., and Roos, Y. H. (2017). Water sorption-induced crystallization, structural relaxations and strength analysis of relaxation times in amorphous lactose/whey protein systems. *J. Food Eng.*, **196**, 150–158.
- 32) Jelen, P. (2009). Dried whey, whey proteins, lactose and lactose derivative products, In “Dairy Powders and Concentrated Products,” ed. by A. Y. Tamime, Wiley-Blackwell Publisher, New Jersey, pp. 255–267.
- 33) Hogan, S. A. and O'Callaghan, D. J. (2010). Influence of milk proteins on the development of lactose-induced stickiness in dairy powders. *Int. Dairy J.*, **20**, 212–221.
- 34) Saffari, M. and Langrish, T. (2014). Effect of lactic acid in-process crystallization of lactose/protein powders during spray drying. *J. Food Eng.*, **137**, 88–94.
- 35) Chandrapala, J. and Vasiljevic, T. (2017). Properties of spray dried lactose powders influenced by presence of lactic acid and calcium. *J. Food Eng.*, **198**, 63–71.
- 36) Murti, R. A., Paterson, A. H. J., Pearce, D., and Bronlund, J. E. (2010). The influence of particle velocity on the stickiness of milk powder. *Int. Dairy J.*, **20**, 121–127.
- 37) Southwell, D. B., Langrish, T. A. G., and Fletcher, D. F. (2001). Use of computational fluid dynamics techniques to assess design alternatives for the plenum chamber of a small spray dryer. *Drying Technol.*, **19** (2), 257–268.
- 38) Bédas, M., Tanguy, G., Dolivet, A., Méjean, S., Gaucheron, F., Garric, G., Senard, G., Jeantet, R., and Schuck, P. (2017). Nanofiltration of lactic acid whey prior to spray drying : Scaling up to a semi-industrial scale. *LWT Food Sci. Technol.*, **79**, 355–360.
- 39) Woo, M. W., Daud, W. R. W., Tasirin, S. M., and Talib, M. Z. M. (2008). Effect of wall surface properties at different drying kinetics on the deposition problem in spray drying. *Drying Technol.*, **26**, 15–26.

(令和 2 年 4 月 6 日受付, 令和 2 年 9 月 4 日受理)