噴霧乾燥粉乳の物理的性質に及ぼす乾燥条件の影響について*

石 岡 要 造**

緒 言

粉乳は脱脂乳を濃度 30~35% まで予備濃縮し、これを仕上り水分 3~4% の乾燥粒子にしたものである。もしこれを乾燥し過ぎても、水分過剰であっても蛋白質の変性が起り、不溶解物を生成する。いずれも粉乳製品とはいえない。粉乳製品を得るために現場で絶えず仕上り水分を管理し、品質を劣化させないように操作しなければならない。粉乳は熱に敏感な物質といわれ、粉乳製造のための熱風温度は 140~160°C で比較的低温であり、また供給液の濃度は 35% 前後の低濃度である。ところが、最近品質を劣化させずに濃縮でき、高濃度でも微粒化できるように、蒸発缶および圧力ノズルが改良されてきている。そこで高温熱風および高濃度供給液で粉乳を製造しようとする機運に至っている。このような製造操作によれば乾燥能力、熱効率は向上するが、粉乳の物理的性状にも影響を及ぼすことが当然考えられる。乾燥粒子の物理的性状に及ぼす乾燥条件の影響について多くの資料^{2,5,11)}がある。しかしこれは粉乳製造条件とはかなり異なるので、その傾向のみが参考になるに過ぎない。

そこで筆者はまずプロパンガス直火法にて 260°C までの高温熱風を得て、この熱風で品質を劣化させることなく粉乳を製造し、次に空気温度、供給濃度、供給温度をパラメーターとした乾燥条件による乾燥粒子の物理的性質に及ぼす影響について検討した。ここで得られた結果を報告する。

1. 実験装置と実験方法

1.1 実験装置

実験装置は工業的装置を 1/10 に縮小した半工業的装置で、その型式は Fig. 1 の系統図のごとく水平並流圧力噴霧式である。装置外観は側面から見ると高さ 2m、横の長さ 5m の矩形型であるが、正面から見ると幅 1.7m でやや扇形をなし、底部は角度 60 度の舟型状である。熱風風筒は直径 30cm で、扇形正面中心部に取付け

られ熱風は 5m/sec の風速で装置内に送入される。この風筒の中心に圧力ノズルを取付け、供給液は装置内に熱風と全く並流に噴霧される。液滴に熱風と装置内でよく混合し乾燥される。乾燥粒子の一部は装置底部に堆積され、一部排風に同伴され装置後部からサイクロンに入り、ここで分離される。ここで散逸した乾燥粒子はさらにバグフィルターで捕集される。各所で回収される粉乳量は各実験によって異なるが、装置内で回収される量は 40~20%、サイクロンでは 60~80%、バグフィルターでは 0.2~0.5% である。

1.2 実験方法

牛乳を固形分 40% の濃縮乳まで蒸発缶で予備濃縮し、これに加水することによって 20 および 30% の所要供給濃縮液を調製した。供給温度は噴霧直前、熱交換器で調整した。送風量を各実験とも一定にし、プロパン直火法で所要熱風温度に調整した。熱風温度によって送入熱量が異なるので、供給量は各実験で異なる。供給量をノズルオリフィス径と噴霧圧力で調節した。供給量によって液滴粒径が異なるので、各実験の噴霧液滴径が異なる。ノズルは Spraying systems Co. 製 Grooved core type ノズルを使用した。このノズルについて筆者がさきに誘導した次の実験式で噴霧条件によって液滴粒径を決定で

(1) Air filter (7) Pressure nozzle
(2) Suction fun (8) Product tank
(3) Propan furnace (9) Cyclone
(4) Drying chamber (10) Exhaust fun
(5) Feed tank (11) Bag filter
(6) Pressure pump T, t. Thermometer

Fig. 1 Schematic diagram of horizontal co-current pressure nozzle type spray dryer

* <Effects of the Drying Conditions on the Physical Properties of Spray-dried Milk Powder>
Received on September 6, 1962

** Yozo Ishioka (Snow Brand Milk Products Co. Ltd., Dairy Lab., Sapporo, Japan)

きる⁶⁾。

$$\bar{D}_{0.75} = \frac{d_0^{1.35} \times a_i \times \mu^{0.26} \times \sigma^{0.62}}{q_i} \quad (1)$$

そこで、実験 10 で供給量を一定にし、液滴粒径のみを変え、噴霧液滴径による効果を検討した。粉乳を製造するのに、予備実験で、仕上り水分と排風温度の関係を決め、本実験の際にはあらかじめ水を噴霧し、所定の排風温度に調整してから供給濃縮乳に切換え、製品の品質劣化を防止管理しながら仕上り水分 3~4% の製品を製造した。

2. 製品の物理的性質の測定方法および電子顕微鏡写真撮影方法

2.1 物理的性質の測定方法

装置内に堆積した製品、サイクロンおよびバグフィルターで捕集された製品を回収し、よく混合し、これを試料とした（以下これを製品試料とよぶ）。次に製品試料をタイラー標準篩（40 メッシュ~300 メッシュまで計 9 種類）で篩分けて分級試料（以下分級試料とよぶ）を得た。製品試料について、水分測定、充填密度測定、粒子密度測定、光学顕微鏡写真、電子顕微鏡写真撮影を行ない、光学顕微鏡写真から粒径分布測定を行なった。また分級試料についても水分、充填密度、粒子密度測定を行なった。

試料 1g を採取し、減圧乾燥器で水分測定した。製品試料の水分を $(1-C_f)$ 分級試料の水分を $(1-C_f)^*$ で表示した。

25ml/円柱容器に試料を充填し軽く叩いて試料容積を減少せしめ、これ以上減少が起らない試料容積とその重量から充填密度を求めた。製品試料充填密度を ρ_0 、分級試料のそれを ρ_0^* で表示した。

Manus の粉乳粒子密度測定法⁷⁾と同様分散媒にミネラルオイル（比重 0.841）を使用し、試料 10g をピクノメーターに採り、ミネラルオイル 3/4 注入して、激しく振盪混合せしめ、粒子間隙および粒子表面の吸着空気除去し、30 分間放置後、 $15 \pm 0.1^\circ\text{C}$ で測定した。製品試料の粒子密度を ρ_p 、分級試料のそれを ρ_p^* で表示した。

試料約 10mg をスライドガラスに採取し、これに低粘度 ($1\text{c}\cdot\text{p}$) シリコンオイルを 2、3 滴注加して、平均に粒子を分散せしめた。対物鏡 $\times 10$ 、接眼鏡 $\times 5$ とし接眼鏡に顕微鏡写真撮影装置をとりつけ、代表的視野 10 箇所について撮影した。この写真から 1 視野約 100 個、計 1,000 個の粉乳粒子径を測定した。さらに体面積平均径 $\bar{D}_{f.75}$ を次の式で算出した。

$$\bar{D}_{f.75} = \Sigma n D_f^3 / \Sigma n D_f^2 \quad (2)$$

2.2 レプリカ法による電子顕微鏡写真撮影法

粉乳の電子顕微鏡写真については未だ発表された報文はない。筆者は二、三の実験方法を試み最終的に粉乳粒子表面に圧力を加えず忠実に表面構造を表現できる次の方法を見出した。まず粉乳を吸湿しないように赤外電燈を照射しながら、コロジウム 2% 溶液を塗布したガラス板上に粉乳を単一層に散布し、コロジウム膜と粉乳との接触面を強靱にするため 15 分間放置し、これにクロームシャドウを行ない、さらにカーボン蒸着を行なった。蒸着膜の厚さは $2.1 \times 10^{-5}\text{cm}$ の厚さである。これをアセトン液に浸漬し、コロジウム膜を溶解除去、次にアンモニヤ溶液で 10~20 分間浸漬して粉乳を溶かし、水洗してレプリカ膜を完成させた。

2.3 超薄切片法による電子顕微鏡写真撮影法

10cc の薬品小瓶に試料を約 1g 採り、それにエチルアルコールと正ブチルメタクリルと 7:3 の割合で混合した液を加え、約 5 時間後に再び混合液を取替え、試料に十分浸透させるとともに脱水をも行なった。その試料を 2% オスミウム酸液で固定し、これを 99.5% エチルアルコールで洗滌し、オスミウム酸を除去し、5 分後エチルアルコールを正ブチルメタクリルの等量混合液で取替え、さらに正ブチルメタクリルとメチルメタクリル 7:3 の混合液に置換し、これに 1% の過酸化ベンゾールを添加し投薬用カプセルに試料を移し替え、 50°C 、8 時間の条件で重合させ包埋を完成させた。

3. 実験結果と考察

3.1 装置内乾燥特性

まず本実験の乾燥特性を一括して Table 1 に示したが、吸込空気を室内から取ったので、その温度は $24 \sim 27^\circ\text{C}$ 、湿度は $0.013 \sim 0.017\text{kg/kg}$ であった。プロパンガス直火法で熱風を生成したので、熱風温度 140°C の場合には 0.006kg/kg 、 260°C の場合には 0.009kg/kg だけさらに増湿される結果となった。吸込空気量は同一だが、プロパンガス生成物、蒸発水分量が高温熱風条件ほど多いので、排風量は多少多い結果となった。しかし装置内平均風速にはほとんど影響はない。高温熱風条件ほど、湿度は高いが、排風温度は $85 \sim 95^\circ\text{C}$ に保持された。装置内空気温度を装置中間上部と中間下部で測定したが、いずれも 100°C 以下で、下部では $70 \sim 75^\circ\text{C}$ であるが、上部は下部より $15 \sim 20^\circ\text{C}$ 高く、 $85 \sim 95^\circ\text{C}$ を保ち排風温度にやや近い。熱移動速度は液滴と空気との温度差に強く左右されるけれど、装置内温度は空気流動、対流、逆混合、熱損失などによって複雑な分布をし、この測定結果から液滴と空気との温度差を求めることは困難で

Table 1 Summary of operating data, drying air conditions

Run No.	Suction		Inlet		Outlet		Mass flow rate M_1 [kg/hr]	Dryer	
	Temp.	Humidity	Temp.	Humidity	Temp.	Humidity		Upward	Downward
	T_a [°C]	H_a [kg/kg]	T_{a1} [°C]	H_{a1} [kg/kg]	T_{a2} [°C]	H_{a2} [kg/kg]		T_u [°C]	T_D [°C]
8-1	24.7	0.013	140	0.019	85	0.028	1,492	85	72
8-2	25.7	0.014	188	0.021	87	0.045	1,523	87	73
8-3	23.5	0.013	217	0.021	87	0.052	1,554	87	75
8-4	23.9	0.013	263	0.022	105	0.063	1,573	108	75
6-2	26.0	0.015	150	0.020	85	0.036	1,506	93.5	71
6-3	26.0	0.015	177	0.020	84	0.045	1,511	89.5	73
6-4	25.5	0.014	227	0.021	86	0.057	1,530	88	75
6-5	25.5	0.014	266	0.022	93	0.070	1,556	95	75
7-1	26.3	0.017	148	0.022	85	0.040	1,474	89	71
7-2	26.3	0.017	183	0.023	85	0.048	1,484	90	72
7-3	27.0	0.017	225	0.024	94	0.061	1,509	100	73
7-4	27.0	0.017	265	0.026	95	0.082	1,521	97	76
9-2	25.0	0.014	158	0.019	82	0.043	1,424	81	75
9-3	25.4	0.014	158	0.019	84	0.046	1,424	84	75
9-4	25.7	0.014	163	0.018	80	0.039	1,424	83	75
10-1	19.2	0.012	247	0.017	88	0.059	1,427	87	76
10-2	18.5	0.011	242	0.015	87	0.054	1,426	93	76
10-3	18.4	0.011	245	0.016	86	0.053	1,427	83	76

ある。送入熱風温度と供給液温度との差 $\Delta t_1 = t_{a1} - t_{m1}$ 、排風温度と製品温度との差 $\Delta t_2 = t_{a2} - t_{m2}$ から対数平均温度差 $(\Delta t)_{lm}$ を求め Table 2 に表示したが、60~105°C である。液滴水分蒸発に要する熱量 Q を (3) 式から求め、見掛けの平均熱容量係数 h_{a1} を (4) 式にて算出した。

$$Q = q_1 C_0 \rho_0 \left[\left(\frac{1 - C_0}{C_0} - \frac{1 - C_f}{C_f} \right) \{ \gamma_w + 0.46(t_{a2} - t_w) \} + \left(C_m + \frac{1 - C_f}{C_f} \right) (t_{m2} - t_{m1}) \right] \quad (3)$$

$$h_{a1} = Q / V(\Delta t)_{lm} \quad (4)$$

(4) 式に諸条件を代入し h_a を求め、Table 2 に表示したが 20~70 kcal/m³·hr·°C であり、熱風温度の高い条件程 h_{a1} が大である。各実験ともに装置内水平方向平均風速 V_g は約 20 cm/sec であり、液滴は噴霧後直ちに終末速度に達し、熱風流に同伴されるので、液滴と熱風との相対速度を無視し、乾燥過程での粒径の変化は予測し難いので、液滴径を採用して次の式から熱移動係数 h を算出した。

$$h = 2k_f / \bar{D}_{0.99} \quad (5)$$

本装置は水平並流式であり、液滴はほとんど熱風に同伴されるので、液滴の沈降速度 V_s を無視し、装置内水平方向平均風速 V_g を採用して、次の式から液滴有効表面積 a を求め、Table 2 に表示した。

$$a = (6q_1 / \bar{D}_{0.99})(L / V_g) / V \quad (6)$$

a 値は液滴径と供給量に左右され、1~15 m²/m³ である。(5) および (6) 式から求めた h および a 値の積、すなわち熱容量係数 ha_2 を求め、Table 2 に表示したが、1,000~40,000 kcal/m³·hr·°C となり、 ha_1/ha_2 値は

Table 2 Summary of drying condition data

Run No.	Δt_{lm} [°C]	h_{a1} [kcal/m ³ ·°C·hr]	h_{a2} [kcal/m ³ ·t·hr]	h_{a2}/h_{a1}	a [m ² /m ³]
8-1	63	20.1	905	45	1.1
8-2	78	37.2	9,480	255	5.4
8-3	81	50.1	7,520	150	5.9
8-4	105	49.0	2,820	58	4.0
6-2	69	26.6	4,590	173	2.8
6-3	75	38.4	3,520	92	3.1
6-4	81	60.5	15,200	250	8.5
6-5	93	61.2	7,380	121	6.5
7-1	67	30.7	8,350	272	3.8
7-2	79	38.2	24,100	294	7.9
7-3	86	50.9	13,700	269	7.4
7-4	96	70.4	17,300	246	10.4
9-2	59	41.7	11,250	270	6.1
9-3	37	71.3	53,800	757	14.1
9-4	69	36.0	2,920	81	2.9
10-1	91	50.1	34,000	679	13.7
10-2	85	49.8	17,350	348	9.7
10-3	90	44.0	24,100	548	10.8

1/50~1/700 であり、桐柴ら¹⁰⁾の結果よりかなり低い条件であった。

3・2 噴霧特性

熱風温度によって空気熱量が変わるので、各実験の供給量は異なる結果となった。供給濃度および温度によって、濃縮乳表面張力はほとんど変わらないが、粘度は激しく変化する。これら供給液物性および供給量によって噴霧液滴径は影響される。本実験では (1) 式にこれら噴霧条件を代入し、計算で求め Table 3 に表示したが、供給液濃度 40% の場合 40~90 μ 、30% の場合 35~65 μ 、

20% の場合 25~40 μ で、各実験共同一液滴で噴霧することはほとんど不可能に近い。そこで実験 10 で液滴径による乾燥粒子の物性に及ぼす影響を検討するため噴霧条件を変えたが噴霧液滴径を 30~40 μ の範囲しか変えることができなかった。

3・3 製品試料の物性

製品試料について水分、充填密度、粒子密度および粒径分布測定結果を Table 4 に表示したが、仕上り水分、最低 2.4%，最高 5.3% の製品を得ることができた。充填密度は 0.451~0.870g/ml，粒子密度は 0.827~1.517

g/ml の製品であった。粒径分布測定結果、体面積平均径 $\bar{D}_{f,vs}$ で 11.3~61.7 μ の製品であった。粒子分布の一例として、実験 8 の測定結果を挙げれば Table 5 のごとくである。測定個数 1,000 について 10 μ 区分に個数を数えたが、10 μ までの小粒子は一番多く、大粒子になるにつれて個数は減少する。最大粒径は 50~150 μ である。この測定結果から体面積平均径を (2) 式で算出すれば、27.5~61.7 μ である。さらに初期液滴径との比 $\bar{D}_{f,vs}/\bar{D}_{0,vs}$ を算出すれば、0.684~0.725 で、いずれも初期液滴径より小である。

Table 3 Summary of operating data. Feed property and atomizing conditions

Run No.	Concentration C_0 [%]	Feed rate q_f [l/hr]	Temp. t_{m1} [°C]	Viscosity μ [c·p]	Density ρ_0 [g/ml]	Surface tension σ [dyne/cm]	Nozzle orifice dia. d_0 [mm]	Core insert area a_i [mm ²]	Nozzle pressure P [kg/cm ²]	Sauter's mean dia. $\bar{D}_{0,vs}$ [μ]
8-1	40	25.8	32	103	1.165	54	0.6	1.142	80	89.5
8-2	40	58.4	32	103	1.165	54	0.6	1.142	220	39.5
8-3	40	80.8	32	103	1.165	54	0.6	1.988	160	49.6
8-4	40	94.4	32	103	1.165	54	1.0	1.988	80	85.2
6-2	30	32.8	32	17	1.120	53	0.6	1.142	80	44.7
6-3	30	51.1	32	17	1.120	53	0.7	1.988	70	62.0
6-4	30	86.1	32	17	1.120	53	0.7	1.988	150	36.7
6-5	30	97.1	32	17	1.120	53	1.0	1.988	120	52.7
7-1	20	33.2	32	6	1.075	53	0.6	1.142	70	33.4
7-2	20	48.1	32	6	1.075	53	0.6	1.142	130	23.0
7-3	20	69.9	32	6	1.075	53	0.7	1.988	250	34.3
7-4	20	107.	32	6	1.075	53	1.0	1.988	120	36.0
9-2	40	48.	45	35	1.163	54	0.6	1.142	100	33.3
9-3	40	56.	84	4	1.140	53.5	0.6	1.142	150	16.3
9-4	40	43.	18	240	1.172	54.5	0.6	1.142	100	61.2
10-1	35	100.	30	16	1.140	54	1.0	1.304	250	30.0
10-2	35	93.	30	16	1.140	54	1.2	1.304	110	41.4
10-3	35	87.	30	16	1.140	54	0.7	1.988	140	33.2

Table 4 Summary of measuring data, physical properties of products

Run No.	Moisture content (1-C) [%]	Bulk density ρ_b [g/ml]	Particle density ρ_f [g/ml]	Sauter's mean dia. $\bar{D}_{f,vs}$ [μ]	$\frac{\bar{D}_{f,vs}}{\bar{D}_{0,vs}}$	$\frac{D_s}{D_0}$	Porosity ϵ [ml/ml]
8-1	5.3	0.870	1.517	61.2	0.684	0.677	0.025
8-2	4.5	0.753	1.435	27.5	0.697	0.677	0.076
8-3	4.1	0.722	1.338	35.4	0.714	0.677	0.140
8-4	2.4	0.656	1.223	61.7	0.725	0.677	0.213
6-2	3.4	0.805	1.430	27.9	0.625	0.607	0.080
9-3	5.0	0.682	1.328	39.7	0.641	0.607	0.145
6-4	3.9	0.663	1.177	24.4	0.665	0.607	0.243
6-5	3.4	0.624	1.103	35.8	0.680	0.607	0.290
7-1	3.9	0.597	1.280	18.4	0.552	0.523	0.177
7-2	3.6	0.587	1.186	13.2	0.573	0.523	0.236
7-3	3.9	0.543	0.989	20.8	0.607	0.523	0.363
7-4	3.6	0.451	0.827	23.2	0.644	0.523	0.468
9-2	4.7	0.740	1.425	23.0	0.692	0.677	0.083
9-3	3.6	0.794	1.445	11.3	0.690	0.672	0.070
9-4	4.5	0.773	1.433	42.6	0.696	0.678	0.078
10-1	3.1	0.608	1.186	21.0	0.700	0.639	0.236
10-2	3.9	0.576	1.230	28.6	0.692	0.639	0.209
10-3	3.1	0.594	1.201	23.1	0.696	0.639	0.227

3・4 分級試料の物性

製品試料は広く粒径分布している。粒径によって装置内での熱および物質移動速度が異なるので、乾燥粒子の物性には粒径によって異なることが考えられる。たとえ同一粒径の乾燥粒子でも、同一乾燥過程を経てきたとは考えられないが、これを選別することは難しい。製品試料を篩分けによって分級すれば、粒径差による物性は予測できるものと考えられる。この分級試料について製品試料と同様、水分、充填密度、粒子密度を測定した。この一例として実験 8-1 の結果を Table 6 に表示した。小粒子程水分は低く製品試料水分との比 $(1-C_f^*)/(1-C_f)$ をとれば、300 メッシュ留りの小粒子は 0.72, 40 メッシュ留りの大粒子で 1.02 である。この関係は乾燥条件によって差は認められず、その他の実験についてもその傾向は一致している。大粒子の充填密度は 0.49 であるが小粒子の充填密度は 0.86 であり、しかも製品試料の充填密度に近い。製品試料の場合には大粒子間隙に小粒子が挟み込まれるため空隙は減少し、小粒子の充填密度に近づくものと考えられる。この関係は乾燥条件によって差異は認められない。また小粒子の粒子密度と大粒子の粒子密度とに差は認められない。この傾向は各実験でも同様に見られる。

3・5 液滴径と乾燥粒子径との比較

供給液濃度と液滴濃度とが等しいとすれば、液滴固形重量は $4/3\pi(D_0/2)^3\rho_0C_0$ で表示できる。ここで、 D_0 は液滴径である。乾燥粒子固形分を C_s 、乾燥粒子密度を ρ_s 、その粒子径を D_s とすれば、乾燥粒子固形重量は、 $4/3\pi(D_s/2)^3\rho_sC_s$ で表示できる。液滴水分は蒸発し除去されるが、液滴固形は残存するので、液滴固形重量と乾燥粒子固形重量には差がないことから、液滴と乾燥粒子間に次の物質収支式が成り立つ。

$$4/3\pi(D_0/2)^3\rho_0C_0 = 4/3\pi(D_s/2)^3\rho_sC_s \quad (7)$$

(7) 式から液滴と乾燥粒子との直径比 D_s/D_0 は次の式で理論的に表示できる。

$$D_s/D_0 = \sqrt[3]{\frac{\rho_0C_0}{\rho_sC_s}} \quad (8)$$

脱脂乳組成は蛋白質 3.117%, 乳糖 4.628%, 脂肪 0.103%, 無機塩類 0.652% および水分 91.500% からなり、これらの内から水分のみが蒸発され、水分 3.5% の製品になり、Table 7 のごとき製品組成になる。それぞれ成分比重 ρ^0 は Table 7 のごとくで、次の式から理論的に製品粒子密度 ρ_s を計算できる。

$$\rho_s = \frac{100\%}{\frac{P(\%)}{\rho_P} + \frac{L(\%)}{\rho_L} + \frac{A(\%)}{\rho_A} + \frac{F(\%)}{\rho_F} + \frac{W(\%)}{\rho_W}} \quad (9)$$

Table 5 Size distribution of dried milk powder

Run No. [μ]	8-1 [n]	8-2 [n]	8-3 [n]	8-4 [n]
10	370	471	430	575
20	331	361	352	243
30	155	151	162	116
40	121	48	91	46
50	105	7	49	36
60	63	0	8	24
70	47	0	4	17
80	18	0	1	14
90	12	0	0	12
100	3	0	0	8
110	3	0	0	3
120	3	0	0	2
130	3	0	0	0
140	2	0	0	1
150	1	0	0	0
Σn_i	1,236	1,038	1,097	1,097
$D_{f,va}$	61.2	27.5	35.4	61.7
D_{max}	150	50	80	140

Table 6 Summary of measuring data, physical properties of sieve fraction. Case of Run 8-1

Sieve fraction sample		W_i	$(1-C_f)^*$	ρ_b^*	ρ_f^*
mesh	opening [micron]	[%]	[%]	[g/ml]	[g/ml]
+300-200	46-74	7.3	3.8	0.86	1.517
+200-180	74-83	9.1	3.9	0.87	1.516
+180-160	83-96	14.5	3.8	0.87	1.516
+160-140	96-110	1.8	4.0	0.86	1.515
+140-120	110-121	5.5	4.5	0.86	1.515
+120-80	121-175	29.0	4.8	0.79	1.514
+80-60	175-246	16.4	5.0	0.65	1.514
+60-40	246-335	10.9	5.3	0.55	1.513
+40	335	5.5	5.4	0.49	1.513
product sample		100.0	5.3	0.87	1.517

Table 7 Composition of dried milk powder and density of the elements

	Raw milk [%]	Dried milk powder [%]	Density [g/ml]
Lactose	4.628	52.55	1.6067
Protein	3.117	35.39	1.4511
Inorganic salts	0.652	7.39	3.0000
Fat	0.103	1.17	0.9310
Moisture	91.500	3.50	1.0000

(9) 式から算出すれば、 $\rho_s = 1.555 \text{ g/ml}$ である。製品固形分 C_s は 96.5% である。 ρ_0C_0 は供給液濃度によって決められるので、 D_s/D_0 は供給液濃度の関数であり、計算できる。液滴と乾燥粒子の理論的直径比 D_s/D_0 を横軸に、液滴と乾燥粒子の体面積平均径比の実測値を縦軸に、熱風温度条件をパラメーターにして点綴したのが、Fig. 2 であるが、実測値は理論値よりいずれも高く、し

かも熱風温度条件の高いほどその差異が大きい。また供給濃度条件の低いほどその差異が大きく、乾燥条件によってその差異が異なることが判る。

理論的に乾燥粒子固形重量を求めるのに、粒子密度を ρ_s として計算したが、Table 4 で示すごとく、測定した粒子密度 ρ_f は ρ_s よりいずれも低い。しかも熱風温度条件の高いほど、また供給濃度条件の低いほど、その差異が大きく、この傾向は液滴と乾燥粒子比と同様である。粒子重量が等しいにもかかわらず、粒子密度が異なるからには、粒子容積が異ならなければならない。粒子容積

が異なるには乾燥粒子内に空気が含有されることが考えられる。Phot 1 に乾燥粒子の断層を電子顕微鏡で観察した写真を示したが、断層上に、蛋白質、脂肪は20~300 μ の黒い微粒子で観察される。乳糖、無機塩類は不明瞭であるが微粒子間空隙に存在する。製品組成が同一であるにもかかわらず乾燥条件によって微粒子間空隙率に差異があるということは、明らかに乾燥粒子内に空気が存在し、しかも乾燥条件によって空気含量が異なることを意味する。乾燥粒子1個の重量を M とすれば、空気を含まない理論的乾燥粒子容積は M/ρ_s 、空気を含む実際の乾燥粒子容積は M/ρ_f である。空気容積は $M(1/\rho_f - 1/\rho_s)$ である。これと M/ρ_f の比を気孔率 ϵ で表わせば次の式になり、定量的に粒子内空気量を決定できる。

$$\epsilon = \rho_f \left(\frac{1}{\rho_f} - \frac{1}{\rho_s} \right) \quad (10)$$

(10) 式から ϵ を計算した結果、Table 3 に示すごとく0.025~0.468の範囲にある空気を含んだ実際の乾燥粒子容積は $V = 4/3\pi(D_f/2)^3$ であるが、空気を含まない理論的乾燥粒子容積は、この容積から空気容積を減じた容積 $V(1-\epsilon) = 4/3\pi(D_s/2)^3$ である。両者の比をとれば、実測粒径と理論粒径比を気孔率の関数として次の式で表わすことができる。

$$\frac{D_f}{D_s} = \frac{1}{\sqrt[3]{1-\epsilon}} \quad (11)$$

液滴と乾燥粒子比の実測値 $\bar{D}_{f,vs}/\bar{D}_{0,vs}$ と理論値 D_s/D_0 との比は $\bar{D}_{0,vs}=D_0$ とすれば、 D_f/D_s になり、(11)式の計算値と一致すると考えられる。横軸に $1/\sqrt[3]{1-\epsilon}$

Fig. 2 Relationship between D_s/D_0 and $\bar{D}_{f,vs}/\bar{D}_{0,vs}$

Phot. 1-A $C_0: 20\%$ $t_{d1}: 140^\circ\text{C}$

Phot. 1-B $C_0: 20\%$ $t_{d1}: 260^\circ\text{C}$

Phot. 1-C $C_0: 40\%$ $t_{d1}: 140^\circ\text{C}$

Phot. 1-D $C_0: 40\%$ $t_{d1}: 260^\circ\text{C}$

Phot. 1 The internal section of the spray-dried milk powder by electron microscope

をとり、縦軸に $(\bar{D}_{f,ss}/\bar{D}_{0,ss})/(D_s/D_0)$ を点綴すれば、**Fig. 3** に示すごとく、両者は D_f/D_s の線と一致する。実際の乾燥粒子径が理論的粒子径より大きいのは、粒子内に空気が含有され、その容積によるものと解釈できる。**Phot 2** に乾燥粒子の表面を電子顕微鏡で観察した写真を示したが、粒子表面には水分が蒸発した結果、収縮、陥没した跡が観察される。気孔率の高い粒子は陥没した跡が大きい、液滴表面が早期に固化されて、完全に収縮しきれず、粒子内に空気を含有するのではないかと考えられる。

3・6 乾燥条件による粒子内気孔率に及ぼす影響

実験 6・7・8 の結果から熱風温度を横軸にとり、供給

Fig. 3 Relationship between $1/\sqrt{1-\varepsilon}$ and $(\bar{D}_f/\bar{D}_0)/(D_s/D_0)$

Phot. 2-A C_0 : 20% t_{01} : 140°C

濃度をパラメーターにして、縦軸に気孔率を点綴すれば **Fig. 4** のごとく、気孔率は熱風温度の上昇とともに直線状に増加する。各供給濃度条件における熱風温度に対する気孔率の増加率 $\gamma = \Delta\varepsilon/\Delta t_{01}$ を縦軸にとり横軸に供給濃度をとれば **Fig. 5** のごとく、140~160°C の範囲で γ

Fig. 4 Relationship between ε and t_{01}

Fig. 5 Relationship between γ and C_0

Phot. 2-B C_0 : 20% t_{01} : 260°C

Phot. 2-C C_0 : 40% t_{01} : 140°C

Phot. 2-D C_0 : 40% t_{01} : 260°C

Phot. 2 The surface of the spray-dried milk powder by electron microscope

は供給濃度の増加とともに低下する。さらに、実験9では、供給濃度を15~85°Cまで変化させ、実験10は液滴径を平均30.0~41.4 μ まで変化させ、他の条件は実験6・7・8とはほぼ一定にしたものであるが、両者の結果をFig. 4に点綴したが、供給濃度を変えても、液滴径を変えても、熱風温度を変えたときにみられるような気孔率

の影響はみられなかった。

〔謝 辞〕 本研究を行なうに当たり、種々ご指導をいただいた北大工学部久郷昌夫教授に厚く感謝いたします。また本報告を発表するに当たり、ご許可下さいました当研究所今村正男所長に厚く感謝いたします。

Nomenclature

a : effective contact area of sprayed drops [m ² /m ³]	L : length of drying chamber [m]
a_i : core-insert area of Spraying System Co. nozzle [mm ²]	M : flow rate of air [kg/hr]
C_f : weight fraction of solid per unit of product [%]	Q : heat load on a spray dryer [kcal/hr]
C_0 : weight fraction of solid per unit of feed	q_l : flow rate of liquid feed [l/hr]
C_m : specific heat of dried solid [kcal/kg·°C]	T_a : room temperature [°C]
C_p : specific heat of air [kcal/kg·°C]	T_w : temperature of drying chamber [°C]
D_f : final diameter of a dried particle [μ]	t_a : air temperature [°C]
D_0 : original diameter of a sprayed drop [μ]	t_m : temperature of drying material [°C]
D_{max} : maximum diameter of a dried particle [μ]	V : volume of drying chamber [m ³]
d_0 : orifice diameter [mm]	V_g : average velocity of air stream [m/hr]
H : absolute humidity [kg/kg]	W_t : weight of fractionated sample per unit product sample
h : film coefficient of heat transfer [kcal/m ² ·hr·°C]	σ : surface tension [dyne/cm]
h_a : volumetric heat transfer coefficient [kcal/m ³ ·hr·°C]	ϵ : void [—]
k_f : thermal conductivity of gas film. [kcal/m·hr·°C]	ϵ_f : porosity [—]
	ρ_0 : density of liquid feed [g/m]
	ρ_b : bulk density product [g/ml]
	ρ_f : apparent particle density of a dried particle [g/ml]
	μ : viscosity of liquid feed [c·p]

Literature cited

- Charlesworth, D. H., W. R. Marshall, Jr.: *A. I. Ch. E. Journal*, **6**, 9 (1960)
- Chu, J. C., L. E. Stout, R. M. Busche: *Chem. Eng. Progr.*, **47**, 29 (1951)
- Coulter, S. T.: *J. Dairy-Science*, **10**, 10 (1955)
- Crosby, E. J., W. R. Marshall, Jr.: *Chem. Eng. Progr.*, **54**, 56 (1958)
- Duffie, J. A., W. R. Marshall, Jr.: *Chem. Eng. Progr.*, **49**, 417, 480 (1953)
- Isbioka, Y.: *Chem. Eng. (Japan)*, **28**, 52 (1964)
- Manus, I. J., U. S. Ashworth: *J. Dairy Science*, **11**, 935 (1948)
- Marshall, W. R., Jr.: *Chem. Eng. Progr. Monograph Series*, **50**, 91 (1954)
- Saito, M.: *Physics of milk and milk products*, Chikyu Shuppansha, p. 48 (1955)
- Toei, R. et al.: the 27 th annual meeting, Soc. of Chem. Eng. (Japan), Apr., 1963
- Wallman, H., H. A. Blyth: *Ind. Eng. Chem.*, **43**, 1480 (1951)

電界を加えた場合のスラリー回分沈降特性 (油川 博, 化学工学, 28, 732~9 (1964)) 本報文は, 粉粒体表面と分散媒との間に生ずる電位の特性を利用して, スラリーに電界を加えることによって沈降速度ならびに最大濃縮度が重力沈降のそれに比べて著しく増大することを明らかにしたものである。スラリーに電界を加えた場合の沈降速度は, 重力沈降速度と電気泳動速度の和として求められることを示し, ジュール熱による粘度低下の影響についても検討した。また, 電界によって濃縮度が増加する理由については, スラッジ層の粒子が組織化されて固定化する結果電気浸透現象が生じ, このために脱水されるものと推察した。

粘性流れ域における充填層内粒子-流体間物質移動 (田中久弥・北浦嘉之, 化学工学, 28, 740~7 (1964)) 層流域における充填層内単一粒子からの物質移動にたいして, 空間率の影響を i) 流れにたいする粒子相互の干渉に起因するものと ii) 移動物質の分子拡散にたいする他粒子の干渉に起因するものとにわけて解析した。その結果, 強制対流支配および分子拡散支配のそれぞれについて移動速度の空間率特性を $A'(a/b)$ ならびに $a(a/b)$ なる二つの特性関数で表わすことができた。これらをもとに充填層内積層単一活性球による結果を広範囲の空間率域で整理した。

同位体クロマトグラフィによる炭酸ガスの多孔質粒子内自己拡散係数の決定 (手島英夫・森田徳義, 化学工学, 28, 748~54 (1964)) 流通系において, $1/8" \times 1/8"$ 柱状アルミナベレット内への炭酸ガスの自己拡散係数を, パルスで与えた $^{14}\text{CO}_2$ のクロマトグラムのピークの位置, すなわち保持時間と気体流速との関係から決定した。本実験条件の範囲内では保持時間は粒子内拡散で支配されることが示され, 得られた拡散係数を van Deemter の方法および Rothfeld の実測式と比較して, 本報文の方法がほぼ正確な拡散係数を与えることを示した。

メタノール-水系の拡散に関する研究 (高松武一郎・平岡正勝・田中幹也・井上嘉亀・大杉彰, 化学工学, 28, 755~60 (1964)) 屈折率-濃度関係が非線形であり, 混合による容積変化が無視しえない非理想溶液の一例としてメタノール-水系を選び, $0 \sim 100$, $0 \sim 20$, $20 \sim 40$, $0 \sim 40$, $60 \sim 80$, $80 \sim 100$, $60 \sim 100$ wt% の各溶液の組合わせに対して, ジュリーレン・ナイフエッジ法によるデータを不可逆過程の熱力学の理論にもとづいて解析し, 拡散係数と濃度の関係を求めた。これらの結果は, 容積変化の影響が無視しえず, 接触初期の拡散係数が二液の濃度のとり方に依存することを示した。これについて分子会合の面から考察を行なった。

噴霧乾燥粉乳の物理的性質に及ぼす乾燥条件の影響について (石岡要造, 化学工学, 28, 761~8 (1964)) 牛乳の噴霧乾燥において, 噴霧液滴と乾燥粒子との関係をしらべた。乾燥可能な条件範囲では, 乾燥粒子径は液滴粒子径よりも小さい。乾燥粒子の容積は蒸発しなかった残存固形の容積ではなく, その内部に空気を含んだ容積である。したがって, 乾燥粒子径は, 固形容積と空気容積の和の立方根に等しい。その空気量は, 噴霧液滴の含水率が高ければ高いほど多く, また送入熱風温度が高ければ高いほど多いという関係を見出した。

3成分系気液平衡データの一推算法 (広瀬泰雄, 津田充利, 長谷川則昭, 化学工学, 28, 769~71 (1964)) 3成分系の気液平衡データは全組成領域にわたって必要なことはほとんどない。たとえ一部分に限るとしても蒸留計算を行なうためには平滑化をする必要上数多くの実測点を必要とする。この方法は実験回数を減らそうとする試みで, その基礎になっていることは, Margules の式の定数は従来考えられていたような物理的意味を必ずしも持つ必要はなく, 任意の値でもよいということである。2, 3 の例について説明を試みた。

気-液混合効果の動力効率による攪拌装置の最適構造の検討 (山口 巖・森 俊郎・永田進治, 化学工学, 28, 772~5 (1964)) 通気攪拌における液側容量係数と攪拌所要動力との比を「気-液混合効果の動力効率」とよび, これを比較の基準として通気攪拌装置の攪拌翼形状, 翼高さ, 邪魔板などの最適条件の決定を試みた。気-液系では槽内全体にわたる循環流より液の部分的乱れすなわち主として速度一, 圧力頭からなる全ヘッドをより大にする場合, 上記の動力効率がよい。これには邪魔板の受ける抵抗を幾分弱くし, 羽根板枚数および幅が小さく翼長が槽内径の3分の1程度に小にし, また翼の回転抵抗をある程度小にして高速回転させるのがよい。

非ニュートン流体の流動——見掛け剪断速度の決定—— (佐藤忠正・谷山 巖, 化学工学, 28, 775~8 (1964))

運動のエネルギー式を代表剪断応力を用いて無次元化し, 代表剪断応力を含む新しいレイノルズ数, 見かけ粘度を定義した。代表剪断応力を適当にえらべばニュートン流体に対し見かけ粘度は物理的ニュートン粘度と一致し, 非ニュートン流体に対しては見かけ剪断速度を決定することができる。見かけ剪断速度は円管内流れでは $8/D$ に比例し, 攪拌槽では回転数に比例することが明らかとなった。