

## 技術報告

# せんごう塩の粒径、水分と粉粒体諸特性の検討

篠原富男

## 1. 緒言

せんごう塩は用途により粒径、水分、形状等に特徴をもたせて製造され、食品、化学、医薬品工業等のあらゆる分野で使用されている。このような種々の工業プロセスの中で、予め「塩の粉粒体物性とその挙動」いわゆる塩粒子の基礎的要素である粒径、比表面積、嵩密度等の1次物性及び、これらが関係する粉体现象としての圧縮度、安息角等の3次物性について相互関係を把握することは重要である。そこで、せんごう塩を対象に粒径、水分と主要な粉体物性相互の関係を明らかにすると共に、水分による粉体物性変化と粒子間液相の存在状態との関係について検討した。その結果、粒子間液相の存在状態により粉体物性が変わる変曲点があることが推測され、実験により確認されたので報告する。

## 2. 方 法

### 2.1 試料塩及び粒径、水分の調整

試料塩は精製塩、食塩、中粒塩を用い、塩種によりアルコール洗浄して不純物を除き、乾燥、分級した後、設定した粒径及び分布になるように配合し、調製した。試料塩の平均粒径 ( $D$ ) は  $150\sim1200\ \mu\text{m}$ 、標準偏差 ( $\sigma$ ) は  $D/4$  とし 8 水準とした。水分は所定量の試料塩を V 形ミキサーに入れ、塩化ナトリウム飽和溶液を加えて  $0.1\sim2.0\%$  に調整した。

- 平均粒径  $D(\mu\text{m})$  8 水準 142 (48), 293 (72), 331  
(標準偏差  $\sigma\mu\text{m}$ ) (84), 385 (103), 467  
(142), 593 (148), 785  
(325), 1215 (354)
- 水 分  $M(\text{wb}\%)$  7 水準 0.1, 0.4, 0.8, 1.0, 1.2, 1.6, 2.0

### 2.2 粉粒体物性の測定

水分は赤外線水分計により  $180^\circ\text{C}$ 、測定時間 12 分の条件で測定した。

付着力は付着力測定装置 KYT-3000 (株)セイシン企業)により測定し、川北式<sup>1)</sup>で表されるタッピング特性  $1/b$  で表した。

粒度は全自動粒度分布測定装置 (セイシン企業)により測定した。

比表面積は空気透過式粉体比表面積測定装置 (筒井理

化㈱)により測定した。

見掛け密度、圧縮度、安息角等はパウダーテスター PTD 型 (ホソカワミクロン㈱) を用い、「塩の分析と物性測定」<sup>2)</sup>に従い、測定した。

### 2.3 塩粒子間液相における残留平衡状態水分の測定

ポリエチレン袋 (厚み  $80\ \mu\text{m}$ ,  $90\ \text{mm}\phi$ , 高さ 120 cm) を二枚重ねた充填袋 (以下、POT 袋と略記) に粒径調製塩試料 (水分 2.0%) 10.5 kg をタッピング充填後、温度  $23^\circ\text{C}$ 、相対湿度 50% 環境に 1 ヶ月間蔵置し、塩層の上層部から 3 cm の試料について水分 (3 点) を測定し、残留平衡状態水分とした。

### 2.4 1 次物性と 3 次物性の関係

粉体プロセスのトラブル解消には粉体特性要因のチェックシステムが必要とされる。粉体のハンドリング・プロセス設計のチェック・ダイヤグラムについては坂下<sup>3)</sup>が粉体特性上の分類を行っており、その一例を図 1 に示す。図 1 では粒径、比表面積、かさ密度及び形状等の基礎的な粒子物性を 1 次物性、内部及び外部摩擦角、せん断応力等、粒子間に働く相互作用に関する物性を 2 次物性とし、流動性、安息角、ラットホール、フランシング (噴流性)、マスフロー及びアーチング等の現場的な粉体现象を 3 次物性として体系化されている (1 次物性と 3 次物性は 2 次物性によりジョイントされる)。

本報告では上記で区分された物性の中で塩の粉粒体物性として重要な 1 次物性及び 3 次物性について各要因相互間の検討を行った。

### 2.5 重力脱水における残留平衡状態水分

#### 1) 無次元化キャビラリー・サクション・プレッシャーと残留平衡状態水分

粉粒体を入れた充填管を液中に浸漬した後、管の下端を液中に浸漬させた状態で引き上げ、乾燥を避けて放置

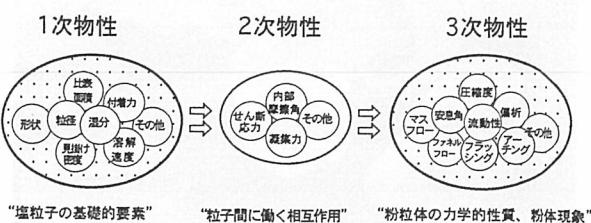


図 1 粉体物性の分類 (粉体物性)

すると上部から下部へ脱液が生じるが、重力による液の移動において、湿潤粒子層内の含液状態とキャピラリー・サクション・プレッシャー ( $P_c$ ) の関係は図2のように表される<sup>4)</sup>。装置上部の漏斗内の粒子層に水を入れ、コックを開いてフラスコに水を抜いた時のサクション・プレッシャーと排水量から求めた含液率については次の関係がある。即ち、AB間では重力による減水により、粒子層表面の間隙に水の凹面ができる、その表面では含水率の僅かな減少でも  $P_c$  の増加が大きい部分である。BC間は粒子層の大きい粒子間隙に空気が吸い込まれる部分で含水率は急激に減少するが、 $P_c$  は殆ど増加しない。さらに、CD間は小さい粒子間隙内に空気が吸引され、含水率の減少と共に  $P_c$  が増大する(索状状態)。DE間では多くの間隙が空気で置き換えられ、細かい間隙内に水がつながっている。E点では水のつながりは全て切れ、水は粒子接触点だけに存在する(懸垂状態)<sup>4)</sup>。また、重力脱水における湿潤粒子層内の空隙飽和度と無次元化キャピラリー・サクション・プレッシャー ( $P$ ) との間に3つの湿潤状態で次の実験式が成立する<sup>5)</sup>。

## 毛管状態

$$S = 1.0 - 0.029P \quad S \geq 0.97 \quad (1)$$

## 索状状態

$$S = 1.3P^{-7.1} \quad 0.97 \geq S \geq 0.40 \quad (2)$$

## 懸垂状態

$$S = 120 \cdot \exp(-5.04P) + 0.085 \quad 0.40 \geq S \quad (3)$$

## 残留平衡状態

$$S_{\infty} = 0.085 \quad (3)'$$

 $S(-)$  : 空隙飽和度 $P(-)$  : 無次元化キャピラリー・サクション・プレッシャー

えられる。そこで、空隙飽和度(3)'式の  $P=\infty$ ,  $S_{\infty}=0.085$  と空隙飽和度=1の水分との積から残留平衡状態水分を試算した。

#### 4) 粉粒体物性変化

重力脱水における残留平衡状態水分は粒子間液相の存在状態の一つである懸垂状態の水分と考えられる。懸垂状態では粒子間の接触点で液相がリング状に存在し、液相相互の連結がなく結晶粒子間に水が架橋する最小状態であることから、この水分量の前後では見掛け密度、安息角、圧縮度等の粉体物性が大きく変化することが考えられる。そこで、2.3項のPOT袋上層部の残留平衡状態の水分と粉粒体物性変化との関係を検討した。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 1次物性

##### 3.1.1 比表面積

せんごう塩は基本的には細孔分布を持たないため、その比表面積は空気透過法 (Lea-Nurse 法) と BET 法での測定値に大きな相違が認められない<sup>2)</sup>。そこで、本項では前者による比表面積を測定した。せんごう塩試料における平均粒径と空気透過法による比表面積の関係は(6)式で表された(図4)。

$$S_w = 15390 D^{-0.867} \quad (r=0.98) \quad (6)$$

$S_w(\text{cm}^2/\text{g})$  : 比表面積  $D(\mu\text{m})$  : 平均粒径

##### 3.1.2 見掛け密度

見掛け密度は粒径、形状及び水分に大きく支配されるが、本項では水分も含めて平均粒径との関係について検討し、図5に示す。両者の関係は各々の平均粒径及び水分について実験式(7)及び(8)式で表された。

$$\rho_a = (0.411 M^2 - 1.196 M + 0.325) + (-0.071 M^2 + 0.208 M + 0.396) \log(D) \quad (7)$$

$$\rho_p = 0.776 + (-0.019 M^2 + 0.075 M + 0.142) \log(D) \quad (8)$$

$\rho_a(\text{g}/\text{cm}^3)$  : 緩み見掛け密度

$\rho_p(\text{g}/\text{cm}^3)$  : 固め見掛け密度

$M(\text{wb}\%)$  : 水分  $D(\mu\text{m})$  : 平均粒径

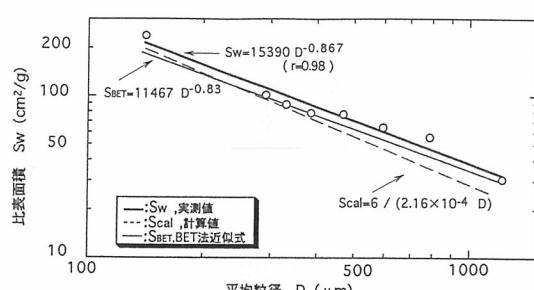


図4 平均粒径と比表面積の関係

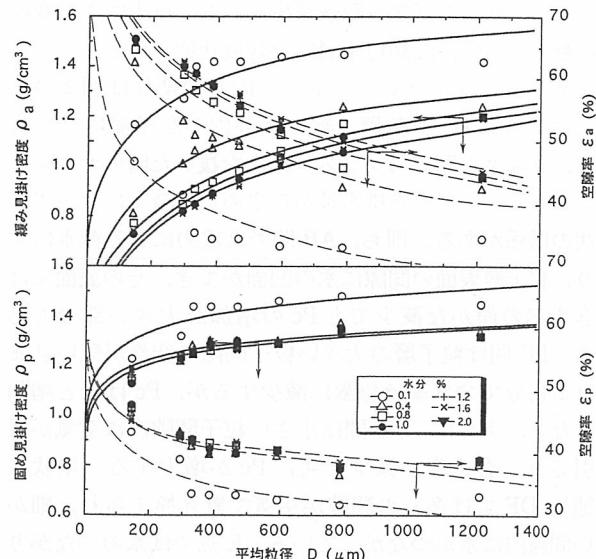


図5 平均粒径、水分と見掛け密度及び空隙率の関係

緩み見掛け密度は包装袋への充填等に、また固め見掛け密度は充填の影響が少ないため汎用的に用いられるが、何れも平均粒径約 400~500 μm までは見掛け密度の急激な増加がみられたが、それ以上では漸増する傾向<sup>2)</sup>を示した。見掛け密度に対する粒径の依存性は例えば水分 0.1% における微粒 150 μm 及び 400 μm の比較では大粒である後者の緩み見掛け密度は約 4 倍となる。

また、水分との関係では水分約 1 % までは見掛け密度は漸次減少するが、それ以上の水分ではほぼ一定となった。見掛け密度の水分依存性は例えば、約 400 μm における水分 0.1% 及び 1.0% の比較では水分が多い後者の緩み見掛け密度は約 2/3 になり、同容積における計量では水分の影響も大きいため、扱いには注意を要する。

##### 3.1.3 付着力

タッピング密度法による付着力は川北式<sup>1)</sup>により一般化されており、 $1/b$  で表される。せんごう塩の付着力と各水分水準における粒径及び比表面積との関係を検討した結果、図6, 7 が得られた。

$$N/Cv = 1/(ab) + N/a \quad (9)$$

$$Cv = (V_0 - V)/V_0 \quad (10)$$

$N(-)$  : タッピング回数  $C(-)$  : かさべり度

$V_0(\text{cm}^3)$  : 初期粉体体積

$V(\text{cm}^3)$  :  $N$  回タッピング後の粉体体積

$a(-)$  : 流動性に関するタッピング特性

$b(-)$  : 付着力に関するタッピング特性

せんごう塩試料の付着力は  $V_0$  を  $N=1$  として予備タッピングする算出法では水分の増加、粒径の減少に伴い

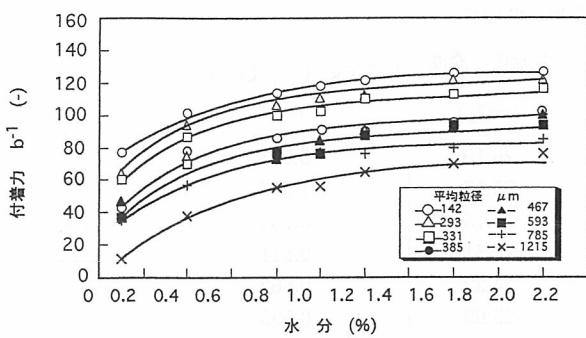


図6 平均粒径、水分と付着力の関係

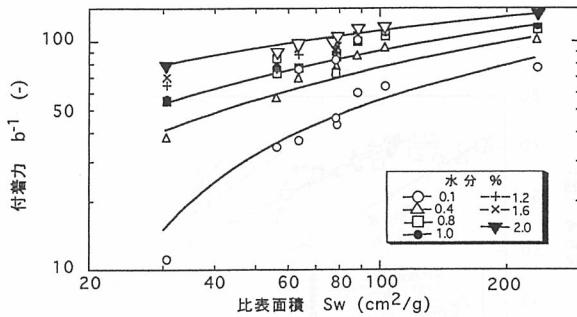


図7 比表面積と付着力の関係

増加し、(11)式で表された。

$$\frac{1}{b} = (-21.3 M^2 + 59.2 M + 230) + (4.34 M - 70.8) \log(D) \quad (11)$$

$\frac{1}{b} (-)$  : 付着力  $M(\text{wb}\%)$  : 水分

$D(\mu\text{m})$  : 平均粒径

### 3.1.4 溶解速度

#### 1) 溶解速度定数

溶解速度を理論的に扱う場合、総括物質移動係数に該当する溶解速度定数を用いた方が便利である。溶解速度定数に関する報告は一定条件下での溶解速度定数  $0.105 \text{ cm/min}$  ( $25^\circ\text{C}$ ) を示した Wagner<sup>6)</sup> の報告がある他、清水ら<sup>7)</sup>が圧力成形した塩化ナトリウムの円盤状ペレット（直径  $20 \text{ mm}$ 、厚さ  $3 \text{ mm}$ ）を用い、ペレット接触面積周囲の平均流速についてレイノルズ (Re) 数と溶解速度定数の関係を求めたものがある。本試験では各種粒径のせんごう塩について上記のカラム上昇法により溶解速度を測定し、本データを用いて参考的に溶解速度定数を検討した。

溶解操作では濃度差 ( $C_2 - C_1$ ) が変化していくことに留意しなければならないが、本報では1分間と短くしている。

以上の点を整理し、以下の式によりせんごう塩の溶解速度定数を算出した。

$dW$  の塩が液量  $Q$  に溶解したときの濃度上昇  $dC$  は

$$dC = dW/Q \quad (12)$$

溶解速度及び溶解速度定数は、それぞれ式(13)及び(14)で表される。

$$dw/dt = -kA(C_s - C) \quad (13)$$

$$k = Q \cdot \ln [(C_s - C_1) / (C_s - C_2)] / A(t_2 - t_1) \quad (14)$$

$Q(\text{cm}^3)$  : 溶液量  $k(\text{cm}/\text{min})$  : 溶解速度定数

$A(\text{cm}^2)$  : 接触面積（全面積）

$C(\text{wt}\%)$  : 時間  $t(\text{min})$  における濃度

$C_1(\text{wt}\%)$  : 初期の溶液濃度

$C_2(\text{wt}\%)$  : 終点の溶液濃度

蒸留水を初期溶液とした場合、溶解時間が早く塩種間の差が小さいため、カラム上昇法では塩化ナトリウム  $22.10 \text{ wt}\%$  の初期溶液濃度 ( $C_1$ ) を用い、これを解消している。試料塩  $20 \text{ g}$  をカラム内に投入後、1分間経過したときの濃度 ( $C_2$ ) から求めた溶解速度定数を表1に示す。

溶解速度定数は温度、固液の接触条件が一定ならば定数であるが、表面の凹凸等、粒子表面状態に支配される。本試験のせんごう塩では各粒径区分 ( $142 \sim 1215 \mu\text{m}$ ) において粒子表面状態や液中での拡散が一定でないと思われるため、見掛けの溶解速度定数として表した結果、 $k = 0.079 \sim 0.130 \text{ cm}/\text{min}$  の値が得られた。

#### 2) 粒径及び比表面積との関係

平均粒径と溶解速度は(15)式で表されるように最も関係が深いものであり、せんごう塩について両者の関係を図8に示す。

$$S = 32.8 - 9.73 \log(D) \quad (r=0.98) \quad (15)$$

$S(\text{g}/\text{min})$  : 溶解速度  $D(\mu\text{m})$  : 平均粒径

### 3.2 1次物性と3次物性及び3次物性相互の関係

#### 3.2.1 安息角

安息角の代表的な測定には排出法、注入法がある。本報で用いた注入法は平板上に排出される場合、大粒子を形成しながら、円錐上をより遠方まで転がる傾向があるため、排出法の場合より安息角は小さくなる。また、注入法の安息角は粒子径 (D)、測定スタンドの直径 ( $L_d$ ) にも影響される。標準砂を用いて  $L_d/D = 200, 1000$  とした例では安息角 ( $\phi$ ) が各々  $37^\circ$  及び  $33^\circ$  であり、直径が小さい場合は安息角が大きくなる特性がある。なお、本試験の測定スタンドは直径  $80 \text{ mm}$ ,  $L_d/D = 80$  (大粒)～ $600$  (小粒) である。

#### 1) 粒径、水分及び見掛け密度の影響

せんごう塩の安息角と粒径及び水分との関係を図9に示すが、安息角は粒径に反比例し、水分に比例する結

表1 センゴウ塩の溶解速度定数

粒径 D/σ (μm)	比表面積 Sw (cm <sup>2</sup> /g)	全面積 A (cm <sup>2</sup> /20 g)	Q/A(t <sub>2</sub> -t <sub>1</sub> ) (cm/min)	初期濃度 C <sub>1</sub> (wt%)	1分後の濃度 C <sub>2</sub> (wt%)	ln [(Cs-C <sub>1</sub> )/(Cs-C <sub>2</sub> )] (-)	溶解速度定数 k (cm/min)
142/48	236.8	4736	0.0422	22.22	26.19	3.043	0.129
293/72	102.6	2052	0.0975	22.21	25.18	1.236	0.121
331/84	88.4	1768	0.1131	22.21	24.75	0.933	0.106
385/103	78.5	1570	0.1274	22.16	24.51	0.811	0.103
467/142	78.0	1560	0.1282	22.1	24.22	0.662	0.085
593/148	63.8	1276	0.1567	22.21	23.99	0.555	0.087
785/325	56.2	1124	0.1779	22.21	23.69	0.436	0.078
1215/354	30.6	612	0.3268	22.20	23.43	0.349	0.114

Q(cm<sup>3</sup>) : 溶液量 200(cm<sup>3</sup>), Cs(wt%) : 鮫和濃度, 23.69 wt% (at 20°C)

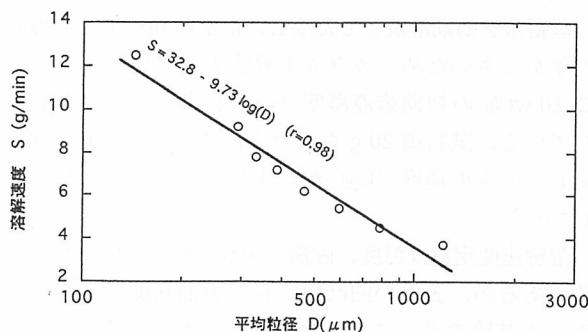


図8 平均粒径と溶解速度の関係

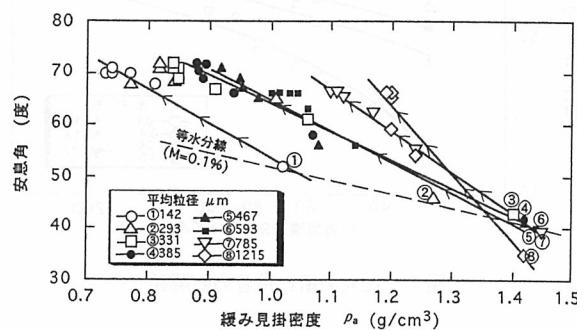


図10 緩み見掛け密度と安息角の関係

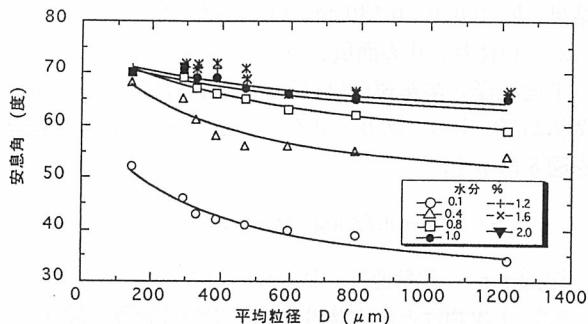


図9 平均粒径、水分と安息角の関係

果が得られた。安息角と粒径及び水分との関係を次式に示す。

$$\phi = 0.338[(-21.3 M^2 + 59.2 M + 230) + (4.34 M - 70.8) \log(D)] + 34.1 \quad (r=0.93) \quad (16)$$

φ : 安息角 (度) M(wb%) : 水分

D(μm) : 平均粒径

また、図5から見掛け密度はほぼ粒径に比例し、水分に反比例する。このことから、安息角と見掛け密度は共に塩粒子相互の充填配列状態に影響されると考えられ、両者の関係を整理すると、図10の様になる。図中

の①～⑥はセンゴウ塩の水分 0.1% であり、等水分線の一例として記入した。この図では粒径が大きくなる程、見掛け密度が大きく、水分の増加に伴い、矢印の方向に進み、見掛け密度は減少し、安息角は増大する。

センゴウ塩では緩み見掛け密度及び安息角のどちらも結晶間で形成される空隙や接点数に大きく影響されるため、類似した傾向がある。しかし、固め見掛け密度は粉体層が固く圧縮されるため、初期の空隙率や粒子接触点数の影響により、粒径や付着力の影響が大きくなると考えられ、上記の関係は明確ではなかった。

## 2) 付着力との関係

付着力が増加すると安息角は増加する傾向がみられ、両者の関係は以下の実験式で表された（図11）。

$$\phi = 0.338b^{-1} + 34.1 \quad (r=0.93) \quad (17)$$

b<sup>-1</sup>(-) : 付着力

## 3) 圧縮度との関係

センゴウ塩の安息角と圧縮度の関係を図12に示す。等粒径線の一例を図中に示すが、圧縮度は粒径の増加に伴い矢印の方向に進み減少する。

なお、センゴウ塩の圧縮度と安息角の関係は次式で表された。

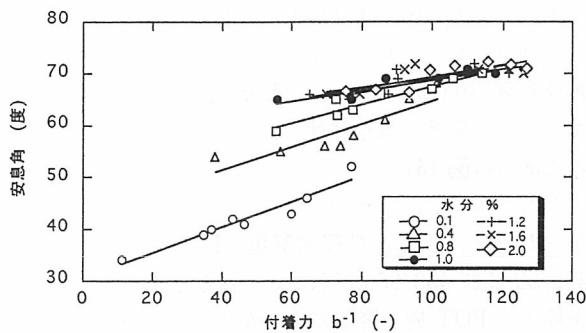


図 11 付着力と安息角の関係

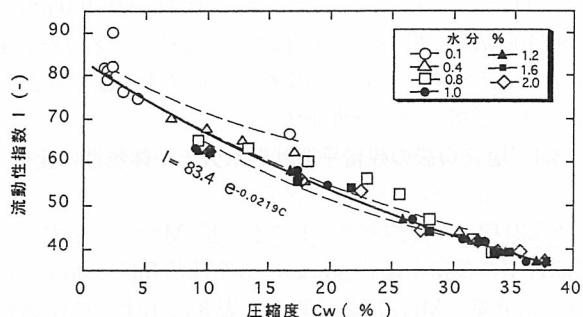


図 13 圧縮度と流动性指数の関係

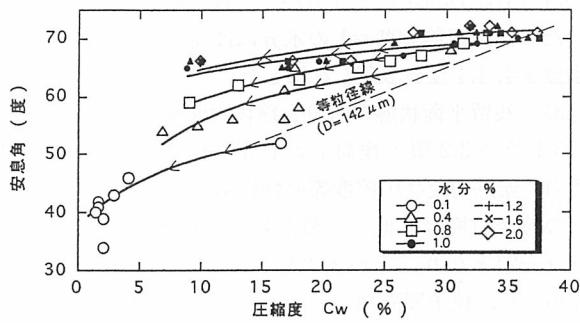


図 12 圧縮度と安息角の関係

$$\phi = 10.2 \ln(Cw) + 34.7 \quad (r=0.93) \quad (18)$$

Cw : 圧縮度 (%)

### 3.2.2 流動性指数

流動性指数で用いる測定 4 因子（圧縮度、安息角、スパチュラ角及び均一度）は一定範囲の測定値を区分し、配点、指数化したものであり、従ってこれを合計して算出した流動性指数は不連続的なものである。また、せんごう塩での測定例では水分が非常に多い場合、安息角の測定値及び配点指数が限界を持った値となり、問題がある。

しかし、流動性指数は粉粒体の流動性の程度や貯槽に

おける架橋対策などを具体的に表現する場合には便利な方法であるため、ここでは参考的に用いた。

本項で求めた流動性指数と圧縮度との関係を図 13 に示す。食塩の検討例<sup>8)</sup>では流動性指数と圧縮度との寄与率は約 62% であり、流動性指数とは最も関係が深い成分である。また、坂下ら<sup>3)</sup>は特に粉粒体においては流動性指数と圧縮度は相関が高く、圧縮度だけで流動性を評価しているが、図 13 で判断する限り、せんごう塩の場合も圧縮度のみで Carr の定義する流動性の概略を評価してもよいと考えられる。なお、両者の関係式を次式に示す。

$$I = 83.4 \exp(-0.0219 Cw) \quad (r=0.96) \quad (19)$$

I : 流動性指数 (−) Cw : 圧縮度 (%)

### 3.3 粉粒体物性値と関係式

形状をほぼ立方体、粒度の分布（粒径標準偏差）をほぼ一定 ( $D/4$ ) としたせんごう塩については粉粒体の基礎的要素の把握や粉体現象の解明に必要な物性項目は最低でも粒径と水分のみを測定することで、他の関連する全物性項目を推定できると考え、関係式を表 2 に示す。

なお、製塩 7 工場が製造するせんごう塩には主に純度対応の特級塩、粒度対応の白塩がある。これらのの中で微粒、中粒、中粒ワイドに関する代表的な塩種（18 点）

表 2 せんごう塩の粉粒体物性値と関係式

比表面積 見掛け密度 (緩み、固め)  付着力 溶解速度 安息角  圧縮度	• $S_w = 15390 D^{-0.867}$	(1)
	• $\rho_a = (0.411 M^2 - 1.196 M + 0.325) + (-0.071 M^2 + 0.208 M + 0.396) \log(D)$	(2)
	• $\rho_p = 0.776 + (-0.019 M^2 + 0.075 M + 0.142) \log(D)$	(3)
	• $1/b = (-21.3 M^2 + 59.2 M + 230) + (4.34 M - 70.8) \log(D)$	(4)
	• $S = 32.8 - 9.73 \log(D)$	(5)
	• $\phi = 0.338 [(-21.3 M^2 + 59.2 M + 230) + (4.34 M - 70.8) \log(D)] + 34.1$	(6)
	• $\phi = 0.338 b^{-1} + 34.1$	(7)
	• $\phi = 10.2 \ln(Cw) + 34.7$	(8)
	• $Cw = (\rho_p - \rho_a) \cdot 100 / \rho_p$	(9)

$D(\mu\text{m})$  : 平均粒径  $M(\text{wb}\%)$  : 水分  $S_w(\text{cm}^2/\text{g})$  : 比表面積  $\rho_a(\text{g}/\text{cm}^3)$  : 緩み見掛け密度  $\rho_p(\text{g}/\text{cm}^3)$  : 固め見掛け密度  
 $1/b(-)$  : 付着力  $S$  : 溶解速度 ( $\text{g}/\text{min}$ )  $\phi$  : 安息角 (度)  $Cw$  : 圧縮度 (%)

の  $\sigma/D$  は、 $1/5 \sim 2/5$  (例えば、 $\sigma/D = 80/400 \mu\text{m} \sim 160/400 \mu\text{m}$  に相当) の範囲に入る塩種が、約 72% みられることがから、それらの塩種についても上記の検討内容がほぼ活用できると推測する。

### 3.4 塩充填袋の残留平衡状態水分と粉体物性の変化

#### 1) 残留平衡状態水分の試算値

2.5.2) 項の空隙飽和度 = 1 の水分量 ( $M_{S=1}$ ) を求め、2.5.1) 項の残留平衡状態における空隙飽和度 0.085 における水分量 ( $M_{res}$ ) を試算し、表 3 に示す。粒径調製塩  $142 \sim 1215 \mu\text{m}$  における残留平衡状態の水分は 1.1 ~ 1.3% であった。

#### 2) 残留平衡状態水分の実測値

各粒径における POT 袋の上層部における塩の残留平衡状態水分を図 14 に示す。残留平衡状態水分は粒径の増加に伴い減少する傾向が認められ、粒径  $350 \mu\text{m}$  以上ではほぼ一定で 0.9 ~ 1.1% を示した。これら塩の残留平衡状態水分と試算値(表 3)とを比較すると、実測値は粒径  $350 \mu\text{m}$  以上では試算値よりやや小さく、それ以下の粒径ではやや大きくなる傾向を示した。これらの相違は無次元化キャビラリー・サクション・プレッシャーが最大となる残留平衡状態水分の近似式(3)' 式が粒径  $150 \sim 500 \mu\text{m}$  の球状ガラスや相馬標準砂を対象に浸漬液として蒸留水を用いた場合の測定例であり、本試験で用いた塩とは粉粒体の形状、空隙率及び浸漬液(塩化ナトリウム飽和苦汁)等が異なるためと考えられた。

表 3 残留平衡状態水分の計算値

平均粒径 $D$ ( $\mu\text{m}$ )	水分測定値 $M_{S=1}$ (%)	空隙率 $\varepsilon$ (-)	残留平衡状態水分 $M_{res}$ (%)
142	14.6	0.189	1.3
293	14.2	0.186	1.3
331	14.1	0.185	1.3
385	13.4	0.175	1.2
467	13.0	0.171	1.1
785	12.2	0.161	1.1
1215	12.5	0.161	1.1

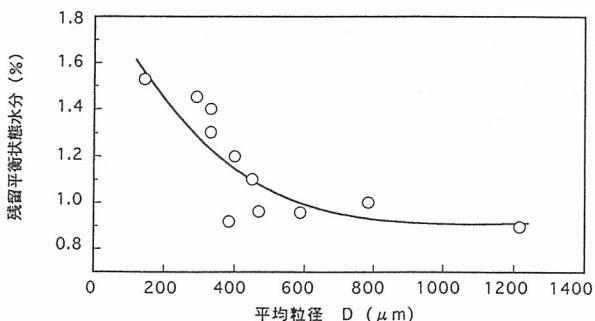


図 14 平均粒径と残留平衡状態水分の関係

本試料塩の残留平衡状態水分は無次元化キャビラリー・サクション・プレッシャーが無限大になった場合の空隙飽和度 (0.085) における水分であり、結晶粒子間ににおける水分架橋の最小状態である懸垂状態水分を表すものである(図 15)。

なお、本項では下層部の水分については測定を行わなかったため、別途、粒径調製塩 ( $D\mu\text{m}/\sigma\mu\text{m}$ ) 332/79, 402/89 及び 453/95 試料により初期水分 2.0% とし同条件下で POT 袋下層部の水分を求めた。下層部の試料塩の空隙が全て水分で満たされれば空隙飽和度 = 1 となり、各粒径における水分は  $M_{S=1}$  の水分(各々 16.5, 14.1, 12.9%)となるが、実際には初期水分が少ないと、空隙飽和度 = 1 の水分にはならず各々の粒径で水分 2.4, 4.4 及び 5.8% を示した。

#### 3) 残留平衡状態の水分と粉体物性変化

3.1 及び 3.2 項で検討した見掛け密度(空隙率)、付着力、安息角及び圧縮度等の物性項目については、いずれの粒径の場合も低水分側から水分約 1% で測定値がほぼ一定となり、その後水分 2% まで変化は認められなかった。粒子間液相の一つである懸垂状態水分の前後では粉粒体物性が変化する可能性があるため、上記の主要な粉体物性が変化する境界の水分領域と図 14 に示す各粒径における残留平衡状態の水分を比較、検討した。圧縮度を一例として両者を重ね合わせた結果、図 16 に示すようにほぼ一致する傾向が認められた。なお、これらの関係は見掛け密度(空隙率)、付着力及び安息角等の物性項目についても同様であった。

以上をまとめると、塩結晶粒子間で液体架橋が開始する水分は重力脱水における残留平衡状態の水分と考えられ、乾燥状態からこの水分未満では液体架橋が充分でないため、水分量に応じて粉粒体现象に変化が起こる。また、この水分を超過し索状状態の水分までは水分が増加するだけで液体架橋はほぼ一定で大きく変化しないため、粉粒体现象にも変化が起こらずほぼ一定値を示すと推

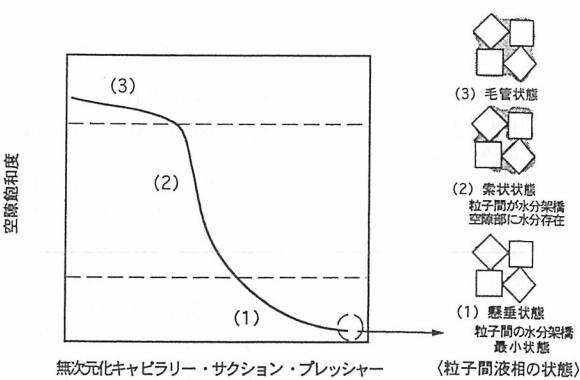


図 15 重力脱水における残留平衡状態水分と粒子間液相の状態

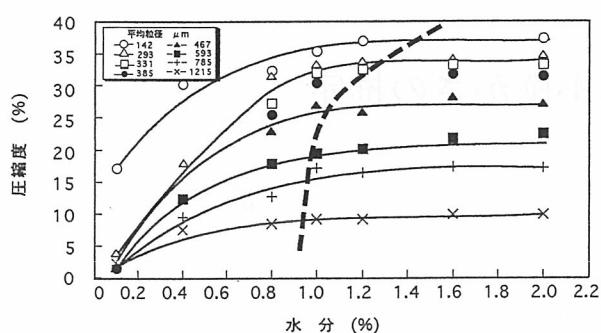


図 16 各種粒径の懸垂状態水分と粉粒体物性変化の領域

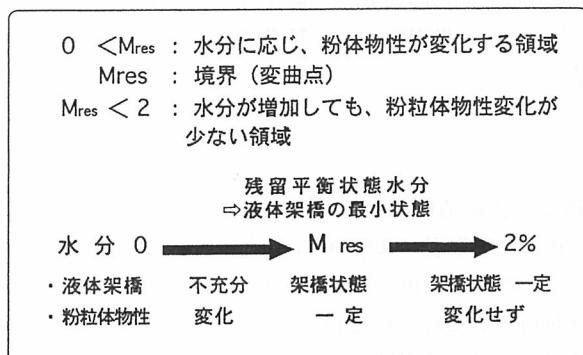


図 17 塩の水分と粉粒体现象の推定

定した（図 17）。

#### 4. 要 約

せんごう塩の基礎的要素である粒径、比表面積、嵩密度等の1次物性及び粉体现象としての圧縮度、安息角等の3次物性について相互の関係を検討し、以下の結果を得た。

- 1) 粉粒体物性は主に粒径と水分により整理でき、それらの関係式を作成した。
- 2) 塩層の水分の存在状態が懸垂状態である残留平衡状態水分は粒径の増加に伴い減少するが、350  $\mu\text{m}$  以上ではほぼ一定となり、水分 0.9~1.1% を示した。
- 3) 粉粒体物性が変化する水分の領域は残留平衡状態水分とはほぼ一致した。

#### 文 献

- 1) 粉体と工業社：粉体と工業，No. 9, 2, p59 (1977)
- 2) 日本海水学会、(財)ソルト・サイエンス研究財団共編：「塩の分析と物性測定」, p312-339 (1992)
- 3) 坂下 摄：「入門粉体トラブル工学」, p13, (株)工業調査会 (1986)
- 4) 大谷茂盛、鈴木 駿、前田四郎：化学工学, P638-645, VOL 27 (1963)
- 5) 久保田徳昭、河上忠男、大谷茂盛：化学工学, P822-824, VOL 27 (1963)
- 6) C. L. Wagner, Z. Phys. Chem., 47, 52 (1904)
- 7) 清水典子、尾方 昇、日本海水学会誌, NO 42, 3 (1988)
- 8) 篠原富男、永塚 敏、尾方 昇、杉田静雄、日本海水学会誌, 42, 63 (1988)

#### Abstract

### Investigation of Various Physical Properties of Particle Size and Moisture Content on Salt produced by a Crystallizer

Tomio SHINOHARA

We studied the relationship between primary physical properties (i.e., particle size, moisture content) and tertiary physical properties (i.e., apparent bulk density, angle of repose, adhesion force and so on) on salt produced by a crystallizer. The results were as follows.

- 1) Most tertiary physical properties of salt produced by a crystallizer can be expressed by only two factors, particle size and moisture content. Thus, we derived expressions of the relationship between them.
- 2) The residual equilibrium moisture content in the salt bulk which is the pendular moisture state, decreases with an increase of the particle size, however in the case of particle size exceeding about 350  $\mu\text{m}$ , the residual equilibrium moisture content becomes almost constant, 0.9~1.1%.
- 3) Even with changes to its physical properties, the moisture content of salt is almost equal to the residual equilibrium moisture content.