大部分を占めている。それはそれぞれ重要なことで、例えば Stepanoff の著書¹⁵⁾に書かれているような具体例の一つ一つの点検は意味あることである。他方、偏析現象の解析についてのいくつかの試み^{16,17)}もあり、それぞれ敬服すべき努力が払われている。しかしこれらの多様な現象と現場的課題にたいして立ち向うべき方向性について、筆者自身がその意味づけをすることができるまでに至っていないので、今回は省略させていただきたい。

参考文献

- 1) 三輪茂雄著：“粉粒体工学”，朝倉書店刊（1972）
- 2) Kvapil, R.: “Schüttgutbewegungen in Bunkern” VEB Verlag Tech. (1959)
- 3) 下村泰人：粉体工学研究会誌，10，No.3，159（1973）
- 4) Wlodarski, A.: *Chem. Stosowana. Ser. B.*, B 5, No.1, 55

- (1968)
- 5) Miles, J.E.P.: *J. Soc. Cosmetic Chemists.*, 21, 53 (1970)
- 6) 三輪茂雄：粉体工学研究会誌，7，No.1，37（1970）
- 7) Wlodarski, A., A. Pfeffer: *Am. Soc. Mech. Engrs. Paper.*, No.68-MH-12 (1968)
- 8) McDougall, I.R., et al: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, 41, No.4, T 73 (1969)
- 9) Holland, J., et al: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, 47, T 154 (1969)
- 10) 三輪茂雄：粉体工学研究会誌，9，No.1，27（1972）
- 11) Kochanova, I.I.: *Ingenerno-Fizicheskii J.*, 20, No.5, 822 (1971)
- 12) Platonov, P.: *Pishchescoe Mashinostloenie.*, No.10, 11 (1958)
- 13) Brown, R.L., J.C. Richards: “Principles of Powder Mechanics”, Pergamon Press (1970)
- 14) 三輪茂雄：粉体工学研究会誌，9，No.1，27（1972）
- 15) Stepanoff, A.J.: “Gravity Flow of Bulk Solids and Transportation of Solids in Suspension”, John Wiley (1969)
- 16) Matthée, H.: *Powder Tech.*, 1, 265 (1968)
- 17) Shinohara, K., et al: *I. E. C. Process Des. Dev.*, 11, No.3, 369 (1972)

iii) 固結性粉体のサイロ貯蔵*

増 沢 力**

1. はじめに

多量の粉体を長期間貯蔵したり、粉体をバラ輸送の途中の基地に一時貯蔵したりする方法として、サイロが必要となる。わが国においても、大豆、メイズ、米などの穀物、セメント、ソーダ灰、その他の無機薬品などの粉体に、それぞれ用途および方法が異なるサイロが使用されている。一般に、サイロに貯蔵する粉体は、流動性を保つ必要があり、粉体粒子間にブリッジまたはアーチと呼ばれる弱い結合状態が生じて、流動性を失ない、取り扱いが困難となる。ましてや、短期間に固結をおこす粉体は、単なる貯槽では貯蔵できない。

塩は非常に吸湿性、固結性が高いので、従来サイロ貯蔵が不可能とされてきた。最近専売公社では、流通経費低減のため、塩のサイロ貯蔵などの必要性が高まってきたので、この方法の開発に着手することとなったが、塩層を時々圧縮空気で攪拌して固結を防止する“空気脈動式”サイロの開発によってほぼ実用化の見通しを得ることができた。

一般に、サイロ貯蔵方法は、使用目的、貯蔵期間の長

さ、貯蔵する粉体の価格、年間の取り扱い量、貯蔵する粉体の性質などにより大幅に変わると考えられる。しかし、一般の固結性粉体のサイロ貯蔵の参考になる点があるかと思われるので、一例として、塩サイロ貯蔵装置の開発の経緯および方法の概略を述べてみたい。

2. 塩の性質

われわれがサイロに貯蔵しようとする塩は、“食塩”（Kitchen salt）と呼ばれる食料塩で、その組成および粉体の性質は表1のとおりである。“食塩”の粒子は塩化ナトリウム（NaCl）の結晶で、典型的な NaCl 型、等軸結晶である。その形状は、写真1のように1稜100～600 μ 程度のほぼ立方体であるが、製造の工程で破壊して一部不定形となっている。市販の食料塩には、このほか水分が2%程度の“並塩”と水分が0.01%程度の“精製塩”とがある。塩の固結性の程度は、例えば、“精製塩”では保存条件によって大幅に異なるが、数日で流動性を失う。塩の場合は、海水中的の不純物に由来する微量の不純物が、固結性に大きな影響を与える²⁾。塩の不純物のなかで、流動性に大きな影響のあるマグネシウムと水分について述べれば³⁾、これらの量によってその示す

* 昭和48年5月21日受理

** Tsutomu Masuzawa 日本専売公社 小田原製塩試験場

表1 食塩の組成および粉体的性質

組 成 [%] ※1							※2 臨界湿度 [% R.H. 25°C]	※3 見掛け密度 [g/cm ³]		※3 安息角	※4 内部 摩擦角	※5 粒 径 分 布 [%]					
Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	H ₂ O		粗	密			149μ 以下	149~ 250μ	250~ 350μ	350~ 500μ	500~ 590μ	590μ 以上
39.2	0.056	0.016	0.025	0.054	60.5	0.076	29	1.38	1.40	41°	42°	0.2	3.7	26.7	66.5	2.5	0.3

※1 日本専売公社分析法⁶⁾による。

※2 試料 200 g を 300 ml の三角フラスコに入れ、25°C の恒温室に 24 時間放置後直接法で測定。

※3 カール法で測定（パウダーテスタ PT-D 型）。

※4 純粋せんだん試験機を用い、直径 70 mm の試料ホルダーに 80 g の試料塩を入れて垂直荷重 3 kg/cm² までの範囲を測定。

※5 試料塩 100 g を 20 分間振とうふるいによるふるい分け法。

写真1 食塩の形状

図1 マグネシウム、水分量と塩の流動性

臨界湿度が異なり、密閉保存した場合の流動性が大幅に変わってくる。その一例を図1に示す。このように微量の不純物を製塩工程において上手にコントロールして、サイロ貯蔵に適する塩に調整する必要がある。“食塩”の場合は、そのままでは流動性を保持できない組成である。“空気脈動式”サイロで保存する食塩は、水分0.2%以下、Mg 0.01%以上を標準とした。同様なことは、他の無機薬品粉体についてもいえると考えられる。このほか、粉体の種類によっては、粉体の粒径を大きくするとか、適当な添加剤を加えるとかして、流動性を保持する方法もあり、取り扱い物質によっては、有効な手段となる。

3. 基礎試験（方法の選択）³⁾

われわれが取り扱う“食塩”程度の品質の塩は、外部から水分が供給されなくても、塩自体の持っている微量の水分で容易に固結する。したがって、工業的に塩の水分を除去して固結を防止することは不可能である。塩は密閉状態ならば、2.で述べた不純物をコントロールしても、ある程度貯蔵可能であろう。また、比較的短期間、吸湿、固結性の高い尿素を密閉タンクで輸送するため、乾燥空気を少量通気している方法¹⁾もある。しかし、一度固結がおこると処理に困ることになる。そこで、われわれが考えた方法は、サイロ内部にある塩の粒子を固結しないように時々動かすことであった。その手段としては、貯蔵塩のサイロ間での入れ替えとサイロ内での攪拌との2通りが考えられたが、種々の条件を考慮して、脱湿した圧縮空気をサイロの下部に送気して、時々攪拌する方法を採用した。試験の目標は、食塩を2カ月間サイロに貯蔵して、その間、流動性を保持し、粒径、水分などの品質を維持することにおいた。まず、直径15 cm、20 cm、50 cmのサイロを試作し、この中に“食塩”を投入し、圧縮空気を送気して、塩層高さや所要圧縮空気圧力、サイロの底面積と所要空気量、脈動の間隔、脈動の状態、水分、粒径などの品質の変化を検討して、この方法によるサイロ貯蔵の可能性を実証した。

4. 中間規模試験³⁾

基礎試験において、“空気脈動式”サイロの見とおしを得たので、直径1 mφ（高さ3~4 m）および3.4 mφ（高さ8 m）にスケールアップしたサイロを試作して、中間規模の試験を行なった。

4.1 サイロ本体の構造

3.4 mφ試験サイロ本体の構造概略を図2に示す。まず、底盤は5°の傾斜をつけ、底部空気室を1区画約1 m²になるよう11区画に分割した。これは、貯蔵塩を均一に脈動するためと底部空気室をエア・スライダとして

使用し貯蔵塩を全量排出できるようにするためである。底盤の最低部には1個の排塩口を設けた。また、底盤はパンチングメタル、SUS 27 の金網、そのうえにサラン布を2重に敷いて、SUS 27 の帯板を押え板とし、ステンレス製ボルトでとめた。塩は砂糖などと同様加工しないで口に入る食品であるから、食品衛生上の見地から、サイロ本体の内面はステンレス製が望まれるが、この試験では、より安価なSS にエポキシ塗装とした。

4・2 圧縮空気の除湿

塩は高い吸湿性を持つので、貯蔵塩の吸湿を防ぐため、送入する圧縮空気は脱湿する必要があった。このため圧縮空気を、アフタークーラーにより海水で冷却脱水すると、塩層を通過する空気の湿度は、常温において20~30% R. H. となった。圧縮空気の乾燥の程度は、種々検討の結果、貯蔵塩の臨界湿度よりやや低いのが望ましい。なお、コンプレッサーは、塩に油ミストの混入を防ぐため、オイルレスの機種を使用する必要があった。

4・3 脈動操作条件

この方法による脈動操作特性を把握するため、種々検討した結果、脈動のための所要圧縮空気の圧力は、ほぼ塩層高さに比例し、塩層高さ5m で $0.7\text{kg/cm}^2\text{G}$ であった。脈動に要する空気量は、底面積 1m^2 あたり $6\sim 12\text{Nm}^3/\text{min}$ であった。通気時間は $60\sim 120\text{s}$ で塩層は十分に流動した。なお、塩層の持ち上がり約30cm 吹き上げは通常50cm 最高2m 程度であった。脈動する間隔は、1~7日に1回で十分であった。この装置で“食塩”60tを12月から翌年9月まで約10ヵ月間、流動性を保持したまま保存することができた。また排塩試験の結果から、自動的にほぼ全量排塩することができた。

4・4 品質の保持

貯蔵された食塩の水分がサイロ保存中に増加すると、固結の原因となるおそれがあるが、本装置で10ヵ月保存しても水分の増加は、わずかであった。また、塩層を脈動することによる食塩粒子の破壊は僅少であった。なお4・2で述べたとおり、オイルレスのコンプレッサーを用いると油の混入もなく、内壁の塗料が混入することもなかった。

4・5 季節の影響

高温多湿期を経過しても、サイロの天井内壁に結露したりすることもなく、塩の水分増加、固結発生もなかった。

4・6 圧力および温湿度の測定

脈動中あるいは静止時におけるサイロ各部の圧力を測定するため、サイロ本体の側壁および底面に圧力計を設置した。各部の測定した圧力は、サイロ設計のための強度計算に用いるばかりでなく、保存中に塩の固結の発生

図2 3.4mφサイロ本体の構造概略

を検知するために利用した。固結が発生すると、静止時の底圧、脈動時の圧力変化などが異常となり、容易に知ることができた。このほか、サイロの内部、外部に温湿度測定装置を取りつけ連続的なデータを採取した。塩の場合図1からわかるように水分が増加するとサイロ内の湿度が増加する。期間中のサイロ内の湿度は50% R. H. 以下に保たれていた。

4・7 サイロ群の構成

脈動は、一時に多量の圧縮空気を使用するから、大容量のコンプレッサーが必要である。この代りに空気槽を設け、小容量のコンプレッサーで空気を溜める方法が有利である。特に単体サイロでなく集合サイロになれば、コンプレッサーで連続して空気を溜め、順次多数のサイロを脈動する方法がさらに有利となる。サイロ本体の L/D (ここでは、 L : 塩層高さ、 D : サイロ直径) については使用材料と空気槽容量の経済性の面から考慮されるべきであるが、これを今空気槽容量の面から求めると空気槽に溜める圧縮空気圧を $7\text{kg/cm}^2\text{G}$ として1.8程度となる。本方式は、混合が主ではなく、固結防止のため塩粒子を流動させれば十分であるから、通気時間は

表 2 試験用大型サイロの設備内容一覧

項 目	内 容
貯 蔵 条 件	貯蔵塩: Mg 0.02% 以上, 水分 0.1% 以下, 平均粒径 300~400 μ , σ 100 μ , 見掛け密度 1.3 g/cm ³ , 安息角 40° 容 量 1,000 t, 貯蔵期間 2 カ月
サイロ群の構成	圧縮機-空気槽-サイロ (単体サイロ)
圧 縮 機	無給油式 1 段圧縮機 7 kg/cm ² G (脈動用), 無給油式 2 段圧縮機 4 kg/cm ² G (送塩用), 無給油式 1 段圧縮機 7 kg/cm ² G (計装用)
空 気 槽	111 m ³ (37 m ³ ×3 基) 7 kg/cm ² G
サイロ本体	円筒型, 直径 8.25 m, 全高 20.9 m, 塩層高さ 15 m, 材質 鋼板製 内面 エポキシ樹脂コーティング, 空気室 56 区画, 底部構造, 床 グレーチング (SS+エポキシ樹脂)+パンチングメタル (SUS 304)+金網 (SUS 304)+布 (テフロン 2 重)+押え板 (SUS 304), 水平と 5° 傾斜 排塩口 4 カ所 (1 カ所はエアスライダー), 排気ダクト直径 80 cm, 外部とはエア・カーテンで遮断
輸 送 設 備	送塩機 圧送式 17 t/hr, 輸送距離 180 m 90° 曲管部 7 カ所 SUS 304 排塩機 圧送式 50 t/hr, 輸送距離 50 m 90° 曲管部 3 カ所 SUS 304
脈 動 条 件	空気量 6~12 Nm ³ /m ² ·min, 脈動間隔 1 日 1 回, 通気時間 60 s
測 定 機	温度計, 湿度計, 圧力計, 多点記録計, 脈動観察用 ITV

表 3 圧送機送塩前後の食塩の粒径分布 [%]

種 別	149 μ 以下	149~250 μ	250~350 μ	350~500 μ	500~590 μ	590 μ 以上
原 料 食 塩 (送塩前)	0.3	4.1	25.9	65.9	3.5	0.2
サイロ投入食塩 (送塩後)	3.7	5.2	23.4	64.1	2.8	0.1

60 s 程度でよいと判断できた。“空気脈動式”サイロによる“食塩”の貯蔵について実験サイロによる特性試験ならびに貯蔵試験を行なって, 実用化の見とおしを得た。粉体としての塩の貯蔵およびバラ輸送システムの確立のため, 技術面あるいはコスト面の総合的な検討が必要となるが, ここでは“空気脈動式”サイロについて次の 3 通りの構成を想定して, 建設費の試算を行ってみた。すなわち, (1) 圧縮機-空気槽-サイロ, (2) 圧縮機-サイロ (内部を仕切り底面積を小さくする), (3) 圧縮機-サイロである。その他の設定条件として (1) サイロ貯蔵取り扱い塩量, 年間 15 万トン, (2) サイロ設備容量 1 万トン, (3) サイロ形状, 円筒・鋼板製, (4) 取出口 (底部) 構造, 帯域型とした。これらの構成, 条件から, サイロ本体, 空気圧縮機, 脱湿器, 除じん機, 電気, 計装, 建物, 構築物の建築費を試算した結果, “空気脈動式”サイロでは (1) 圧縮機-空気槽-サイロの構成が最適であることを明らかにした。

写真 2 試験用大型サイロの全景

5. 試験用大型サイロ⁴⁾

中間規模のサイロについて“食塩”のサイロ貯蔵が可能となったので, 生産地から消費地へバラ輸送する一環として, 岡山県の生産工場に隣接して 1,000 t 規模の試験用大型サイロ (写真 2 参照) を設置して現在貯蔵試験を行なっている。本装置は, 生産工場から, 生産された“食塩”をサイロに輸送し, 輸送された“食塩”をサイロで貯蔵し, その“食塩”をサイロから排出する設備を有している。また実験用なので単体サイロとしたが実用機では二つ以上の集合サイロとなる。また, この装置には, 以降建設する“空気脈動式”サイロの設計資料および操作規準作成の参考にするため, 種々の測定機をとりつけてデータを記録し, 脈動状況を観察できるようにした。

5・1 設備概要

設備概要をまとめると表 2 のようである。また, フロースートを図 3 に示す。

5・2 送 塩 機

送塩機は, 1 バッチ食塩 3.7 t, 送塩距離 180 m (内垂直部 20 m, 90° もしくはこれに近いベンド 7 カ所) 程度で使用したが, 途中 3 カ所にブースター配管を設けて空気を補給した。これには, 元圧, 3.5 kg/cm² G 程度のコンプレッサーで圧縮し脱湿済とした空気を使用した。完全な連続流とすることは困難で, 1 分間に 40~90 程度と間けつ流となり, 配管の振動もあった。平均の混合比 12 程度, 18 t/hr の能力があった。特に留意したのは粒子の破碎であるが, 送塩前後の粒径分析の一例によると表 3 のような値があり多少の粒子の破碎は避けられなかった。

5・3 脈 動 操 作

脈動に要する空気圧力は, ほぼ塩層高さに比例して増加した。1,000 t 送入のとき塩層高さ約 15 m, 空気圧力は約 2 kg/cm² G であった。この場合の標準脈動状態を

図3 試験用大型サイロのフローシート

図4に示す。空気槽に $7\text{ kg/cm}^2\text{ G}$ 程度に溜めた圧縮空気を図3の脈動用電動バルブを開いて通気した。サイロ下部にある56個のバルブの開度を調整し、均一脈動がおり空気槽の圧力が $2\text{ kg/cm}^2\text{ G}$ になるのに約60秒かかるようにした。塩層の持ち上がり高さは30~50cm、吹き上げの最高は3m程度であった。脈動は1日1回行なうことにした。

5.4 排塩操作

排塩は、排塩口に通じる電動ボールバルブを開き、下部空気室に圧縮空気を送ると、サイロ内部の塩は排出口から流出してくる。

5.5 その他

サイロ本体からの排気管は、直径80cmとし、本設備では除じん器を省略したが、脈動時に送塩途中で破碎した微細の塩が噴出して来る。したがって、除じん装置は省略することができない。脈動時の側壁、底面の圧力、静止時の粉体圧など興味あるデータも得られつつあるが、現在試験中なので試験経過をいずれまとめて発表したい。

6. おわりに

以上固結性粉体のサイロ貯蔵の一例として、食塩のサイロ貯蔵の開発経過を述べてきた。われわれもこれが最

図4 試験用大型サイロにおける標準脈動状態

良の方法とは考えていないが、次の良い方法が開発されるまでのつなぎとして、同様な問題をかかえている方々の参考となれば幸いである。

引用文献

- 1) 青木隆一, 小野行朝, 穂刈隆夫, 西島徹: 特許公報 昭46-6602
- 2) 増沢力: 粉体工学研究会誌, 7, 554 (1970)
- 3) 増沢力, 竹中侃三, 藤本好恵, 米井祥男: 粉体工学研究会例会講演要旨集 (昭和47年11月, 名古屋)
- 4) 増沢力, 竹中侃三, 藤本好恵: 粉体工学研究会例会講演要旨集 (昭和48年5月, 名古屋)
- 5) 増沢力, 米井祥男: 海水誌, (投稿中)
- 6) 日本専売公社: “塩務に関する分析方法” (昭和44年6月)