

## サイロ壁体に加わる粉体圧力分布の測定

杉 田 稔  
三 谷 勝 之  
磯 畑 脩  
高 橋 和 男

## § 1. 序

先に、当研究所報第2号<sup>1)</sup>において鉄筋コンクリート製円形サイロ(内径約5m, ホッパーまでの高さ18m, ホッパー部高さ2m, ホッパー上部にcross beamを備えている)に、「粒体」である小麦を投入、抽出した時の、サイロ壁体に加わる圧力分布の測定結果について報告した。

その後、既存のいくつかの「粉体」サイロのなかでも、サイロ下部壁に、かなりの予想しなかったクラックの発生が見られた。その発生の原因としては、先の粒体と同様、抽出時の圧力増大に原因するものと予想された。また、粉体サイロにおいては、抽出時の動的圧力が継続して発生するものと考えられる、サイロ内の粉体を攪拌する作業がサイロ運転中に実在する。したがって、いっそう、動的圧力によるクラックが発生しやすいのではないかと想像された。

その後、当社においても、サイロ建築の需要が増大し、スライディングフォームによるサイロ建築の機会が多くなっている。

そこで、今後の設計資料を得るためにも、実際の操業中にサイロ壁体にどれほどの圧力が加わっているものか、いくつかのサイロについて測定してみることにした。

今回は、当研究所が行なってきた一連のサイロ壁体に加わる圧力測定の中、投入物質が粉体(小麦粉)で、サイロ平面が4角形の鉄筋コンクリート製サイロの場合の測定結果について報告したい。

粉体貯蔵用のサイロの投入物質には、実験を行なった食用用粉体(小麦粉、粉乳、片栗粉等)の他、飼料用粉体(米ぬか、大豆粉等)、セメント、工業用原料粉等の貯蔵物質がある。

しかし、粉体として、すべてが同じ性状を持つとは決っていない。すなわち、粉体の持つ固有の特質(含水率、比重、安息角、摩擦角、粘性、粒形等)がそれぞれ異なり、また、この特質が微妙にサイロ壁体の圧力

に影響してくるのである。

したがって、粉体だけについても、数多くの実験を必要とするが、とりあえず今回は、小麦粉の場合の実測結果を報告する。

一般に小麦粉は、粒度が細かく、粘着性があり、含有水分や外気湿度などによって流動性が変わってくる。このため、貯蔵は、外気の影響を受けにくいようにと、通常はコンクリートタンクに、少量の時には鉄板タンクにて行なわれる。

小麦粉は排出性がきわめて悪く、架橋を生じやすいので、断面形、断面の大きさとタンクの高さの関係、内面仕上げや排出装置に、種々の工夫が試みられている。

今回の実験の目的は、小麦粉サイロの実際の使用状態にのっとり粉体の投入、攪拌、抽出を一周期とする、連続的なサイロ側壁面の静的圧力および動的圧力を測定して、粉体によるサイロ壁体に加わる圧力状態を調査し、今後の設計資料を得ることにある。

同時に、先の測定結果とも比較して、サイロの形状、投入物質、および抽出方法などの違いについて、比較検討してみたい。

## § 2. 実験概要

## 2.1 測定サイロ概要

今回の測定は、昭和産業株式会社のご好意により、鉄筋コンクリート製四角形サイロの2つのタイプについて行なった。

(A) 昭和産業株式会社 鶴見工場Aミル粉サイロ。

(B) 昭和産業株式会社 船橋工場粉サイロ。

その概要図および測定点を図-1、図-2に示す。

(A) ……平面  $1.3^m675 \times 4.3^m650$ ; 高さ  $13.3^m150$

ホッパー部なし。

抽出方法は、図-1に示すように、サイロ底部に2つの小さな隔壁を持ち、チェンコンベアーによりか

き出す方式である。

(B)・・・平面1.㎡660×2.㎡585；高さ 18.㎡100

ホッパー部高さ 約3.㎡300

サイロは3面が垂直壁で、1面が約60°のこう配である偏心ホッパーを持つ。また、オリフィス上部の垂直壁に、図-2に示すような、こう配75°のシンダーコンクリート製の突出部を持つ。これは、サイロ内粉体の流動性をスムーズにし、残留(Dead Stock)を無くし、さらに、ホッパー部上方に生じやすいとされている架橋現象を無くし、抽出量を一定にスムーズにさせる働きを持つ。

抽出方法は、横式回転ロータリー方式で、さらに、ホッパー部斜壁には粉体のすべりを良くするために、鉄板を張り付けてある。

(A)、(B)両サイロとも、サイロ内壁はモルタル金ゴテ仕上げである。

投入口は、図に示すように、中心より多少ずれて設置され、いずれも空気にて吹き出し投入する方法である。

## 2.2 測定方法

先の測定でも判明したように、攪拌および抽出時において、衝撃性の大きな圧力が壁体に加わるものと想定されたので、圧力の連続的自動記録を行なった。

本実験に使用した圧力計は、受感部70φの抵抗線式土圧計(共和電業製)である。本圧力計の性能および仕様

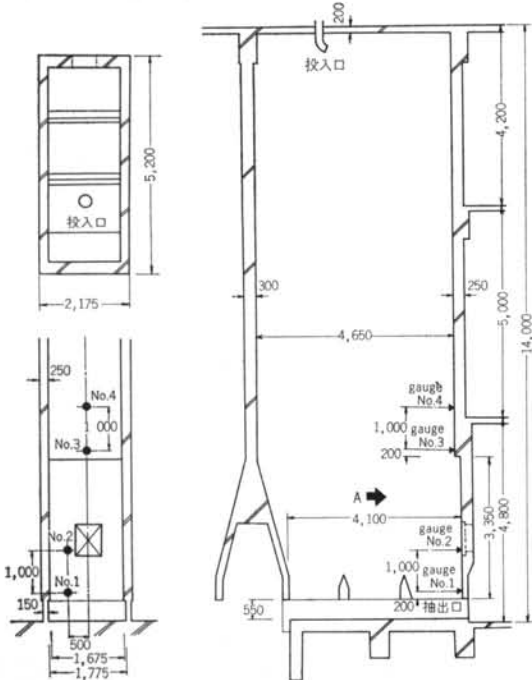
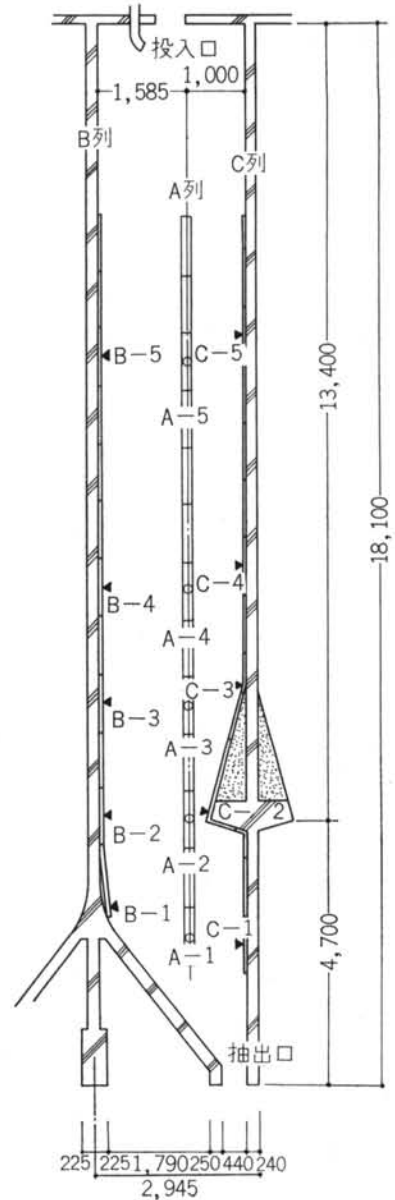
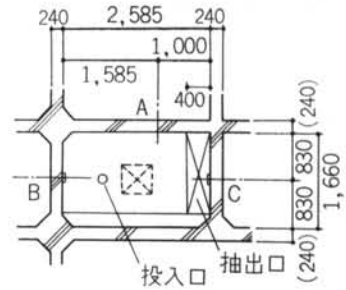


図-1 サイロ形状と測定点

図-2 サイロ形状と測定点

は以下のである。

定格容量 5kg/cm<sup>2</sup> 2kg/cm<sup>2</sup>  
 ゲージ抵抗 350Ω 4 Gauge 法  
 ゲージ感度 2500μ  
 過負荷 120%まで

これらの圧力計を、図-3 に示すように、ライトゲージに取りつけて、図-1 および図-2 に示した測定点に設置した。

各圧力計の読みは、電子管式自動平衡歪記録計および電子管式自動平衡歪打点式記録計（ともに東洋測器製）にて記録させた。

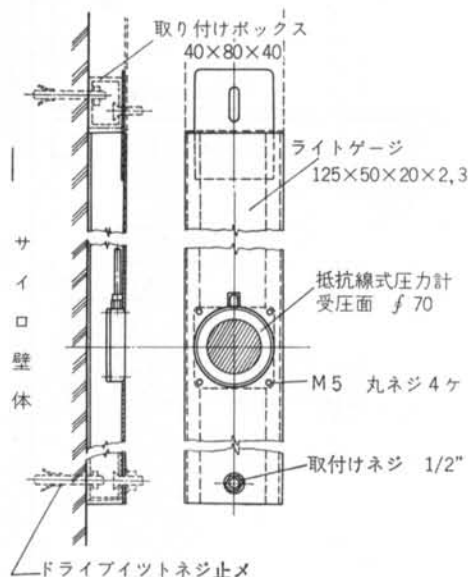
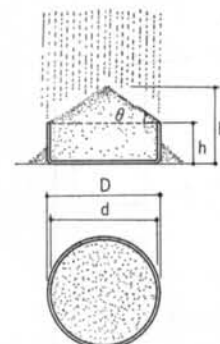


図-3 抵抗線式圧力計の取り付け詳細図

### 2.3 測定試料について



外径D=15.00cm  
 内径d=14.54cm  
 シャーレ高さh=3.4cm  
 $\theta_1 = \tan^{-1} \frac{2(H-h)}{D}$   
 図-4 安息角測定法

(A), (B)各サイロの測定に使用した小麦粉については、表-1 に示す。

見掛の比重および安息角を、当研究所にて測定した結果は、次のとおりになった。

測定試料は恒温恒湿室（温度 21°C~22°C、湿度 48%）に、約 2 日間放置した後測定した。

ふるいを通して自然落下の条件のもとで、試料を測定容器に取り比重を測定した。落下高は約 30cm である。

安息角の測定には、種々の方

法が提案されているが、われわれは注入角法による独自の方法で測定した。

測定方法は、図-4 に示すように、約 30cm の高さより振動するふるいを通して自然落下させ、外径 15cm、高さ 3.4cm のシャーレ上にできる、円すい形の粉のすべり面の角度を測定した。

比重および安息角の測定値を表-2 に示す。

		小麦粉名称	投入総重量	平均投入量	所要時間
(A) サイロ	実験 1.	三笠 (hard)	59.7 t	2.4 t/hr	投入 25 時間 03 分
					攪拌 16 45
	抽出 2 25				
	実験 2.	月桂冠 (soft)	58.5 t	9.0 t/hr	投入 6 30
攪拌 16 45					
抽出 6 55					
(B) サイロ	実験 1.	竜舟 (hard)	30 t	12.4 t/hr	投入 2 25
					攪拌 2 50
	抽出 3 15				
	実験 2.	月桂冠 (soft)	30 t	6.9 t/hr	投入 4 40
攪拌 1 20					
抽出					

表-1

測定試料名	見掛比重	安息角
月桂冠	0.423	平均 65°
	0.421	
	0.42	
竜舟	0.505	平均 58°
	0.517	
	0.512	
	0.51	

表-2

## § 3. 測定結果

### 3.1 測定経過

(A)サイロについては、昭和41年12月1日より、9日間にわたって測定を行なった。

実験1では、No. 2 と No. 3 の圧力は、計器の定格容量 2kg/cm<sup>2</sup> を越えており、その最大圧については明確ではない。

実験2では、No. 1とNo. 2の圧力計を容量の大きい圧力計(5kg/cm<sup>2</sup>)に換えた。No. 3は交換できなかったため、容量超過による、圧力計の塑性変形が表われている。

実験2における、攪拌時の圧力計No. 2の記録については、記録計の走行ペン軸部に粉体が付着して、圧力増加方向の走行を悪くしたため、最大動圧が不明である。

(B)サイロについては、昭和42年6月21日より、4日間にわたって測定を行なった。

(A)サイロ壁体に加わる、圧力変動特性の連続記録の1例を、図-5、図-6、図-7に示す。

(B)サイロ壁体に加わる、圧力変動特性の連続記録を、図-8、図-9、図-10に示す。

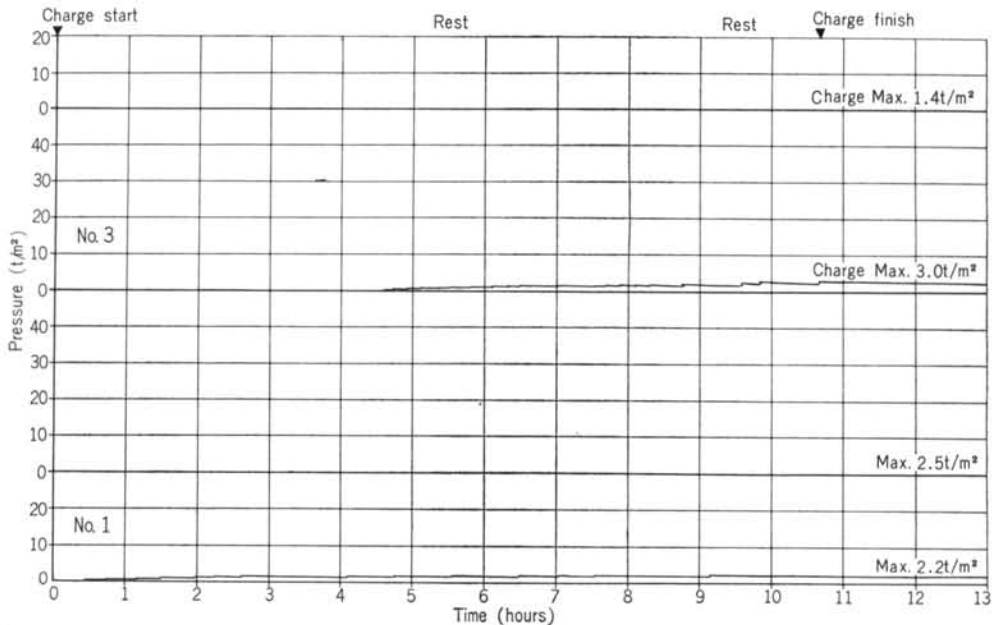


図-5 (A)サイロ圧力変動特性(実験2) 投入時

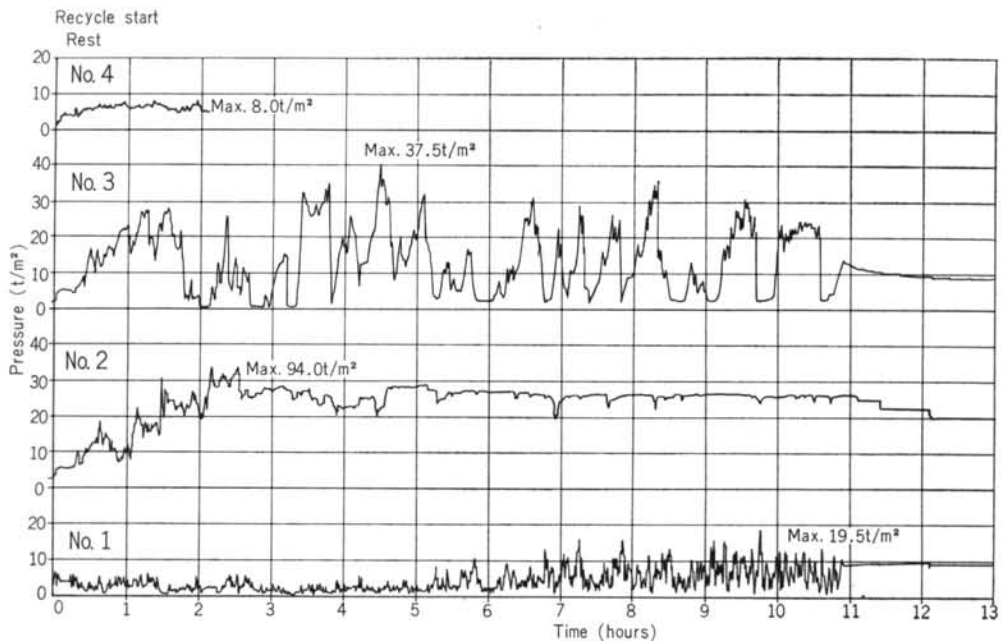


図-6 (A)サイロ圧力変動特性(実験2) リサイクル開始より

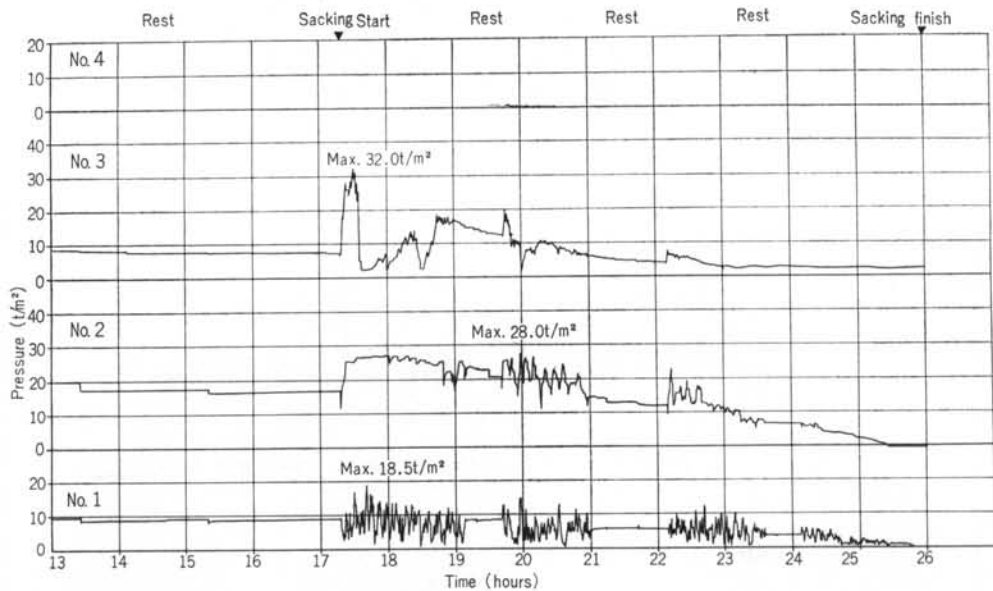


図-7 (A)サイロ圧力変動特性(実験2)

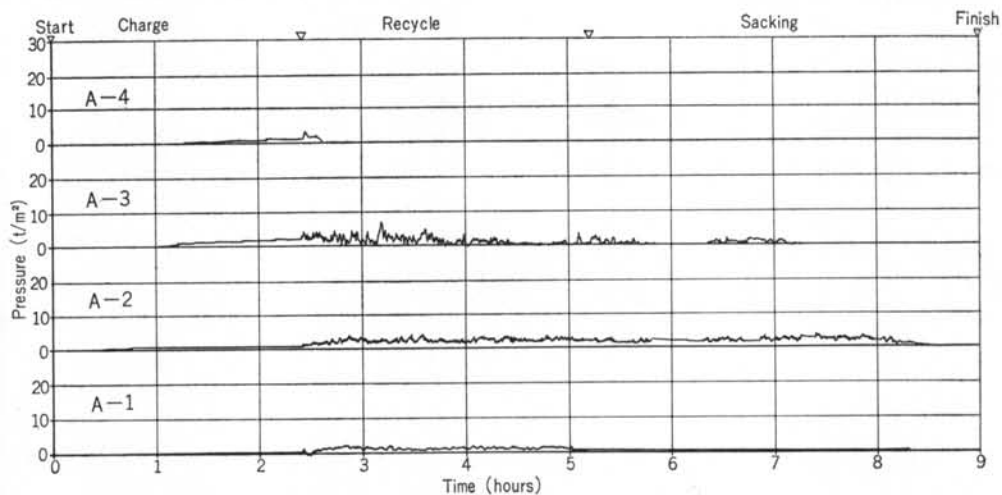


図-8 (B)サイロ圧力変動特性(実験1) A side

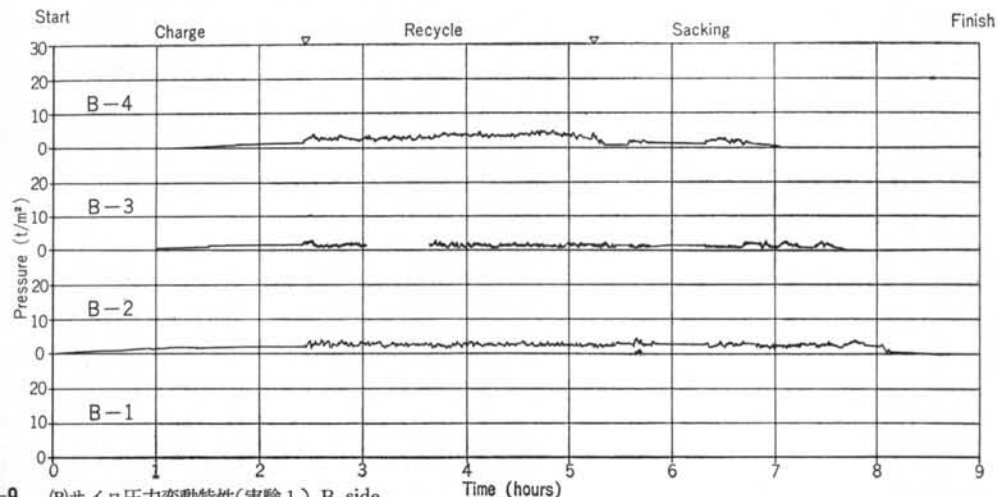
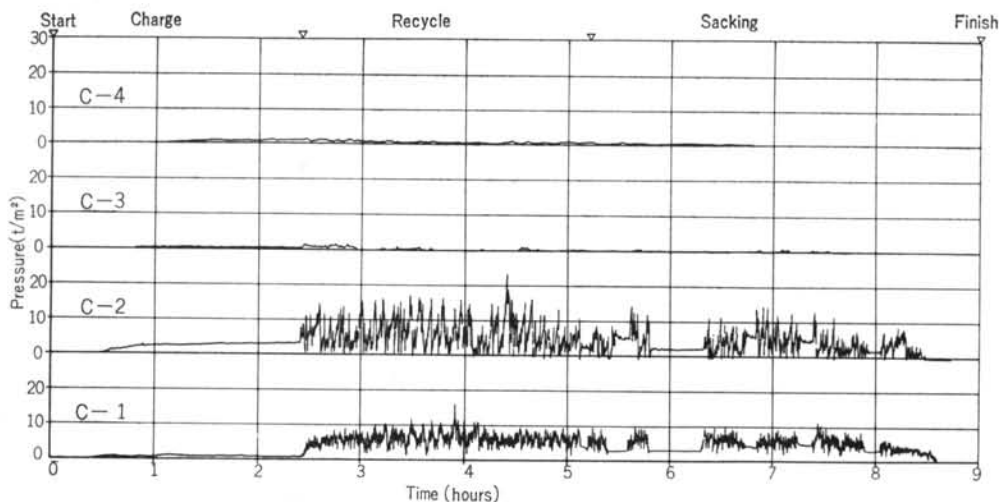


図-9 (B)サイロ圧力変動特性(実験1) B side



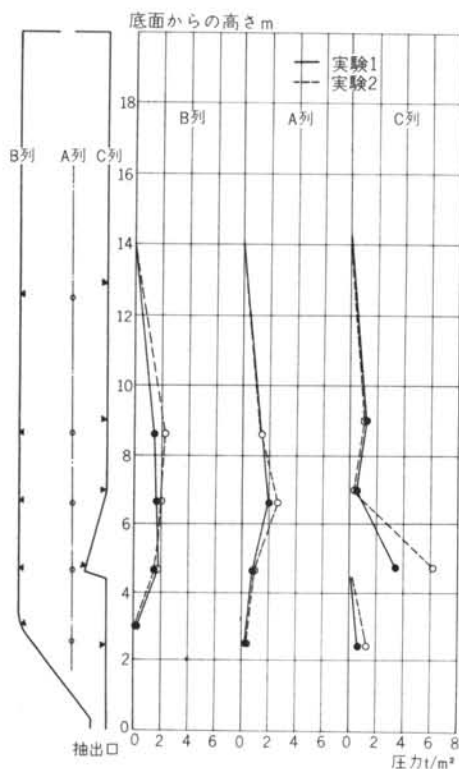
図一10 (B)サイロ圧力変動特性(実験1) C side

### 3.2 投入時における圧力変動特性

#### (A)サイロについて

図一5 より明らかなように、各測定点とも、段階的に上昇してくる緩慢な動きである。圧力の上昇速度は、次第に減少し、ほぼ一定の圧力値に近づく。

投入時の各測定点の最大値を、プロットしたグラフを



図一11 圧力分布性状(投入時最大指示圧力包絡線)

図一16に示す。

#### (B)サイロについて

(A)サイロと同様に、段階的に上昇してくる緩慢な動きである。特に、ホッパー上部にあたる測定点、A-1, B-1, C-1 は、測定点が深い所にあるにもかかわらず、比較的小さい値となっていることは注目される。また、C列突出部上部のC-3も、実験1, 実験2ともに、ほとんど零に近い値を示している。B-1, C-3とも、サイロ壁面の凹な面の静的側圧が、小さい値であることを示しているといえよう。

また、逆に、C面突出部に最大圧を示し、突出部に相対するB面に、B面側の最大側圧を示した。

投入終了時静的圧力分布を図一11に示す。

C面突出部のC-2が、高い圧力値を示したのは、粉体の垂直自重成分が加わっていることに起因すると考えられる。

### 3.3 攪拌時における圧力変動特性

攪拌(リサイクル)は、すでに投入完了した粉体を抽出口より抽出し、その粉体を投入口より再投入するという一連の仕事を、機械的に継続して行なうものである。

#### 3.3.1 (A)サイロについて

##### 実験1

攪拌開始後の、No. 1 と No. 3 の圧力計の圧力変動記録を図一12に示す。

圧力計No. 3の記録には鋸歯状の圧力変動が見られる。

リサイクル開始後1.5時間~2.0時間後に、No. 3の圧力計は最大値を取っている。日記録計のペンが振り切れ、また、圧力計の定格容量を超えているので、最大圧は約  $28\text{t/m}^2 \sim 30\text{t/m}^2$  の値を取ったものと推定される。

鋸歯状の圧力変動の詳細を、自動記録計の記録から、

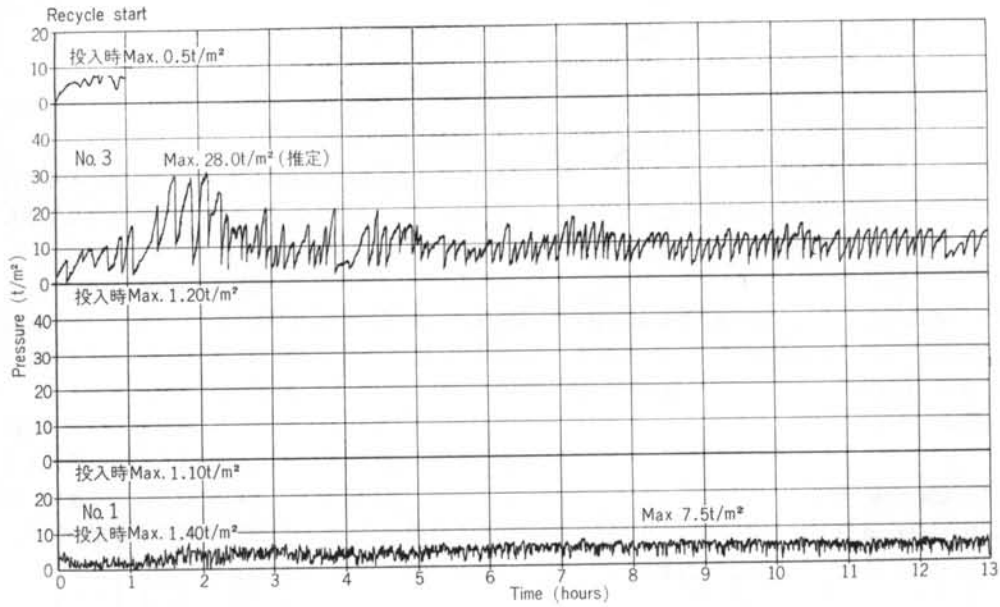


図-12 (A)サイロ圧力変動特性(実験1)

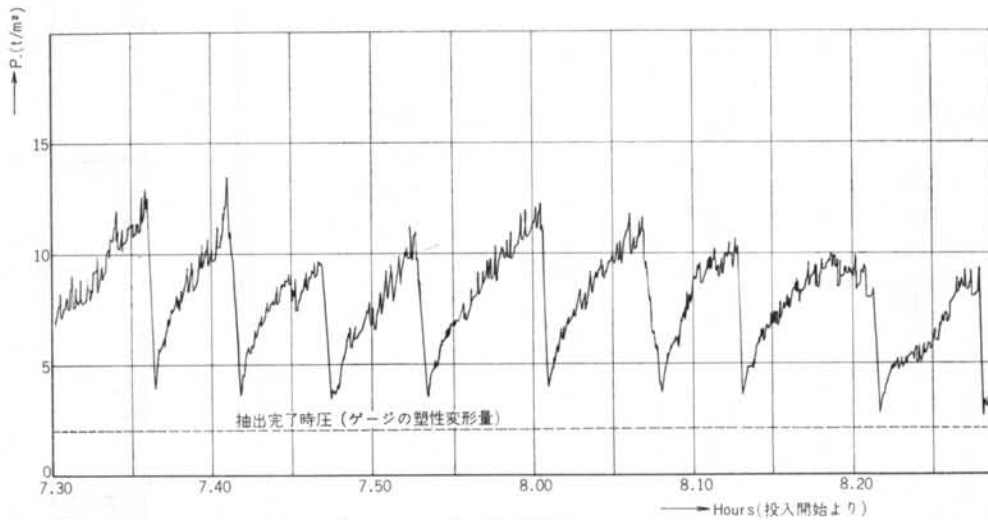


図-13 (A)サイロ No. 3 圧力計(実験1)リサイクル時圧力変動特性

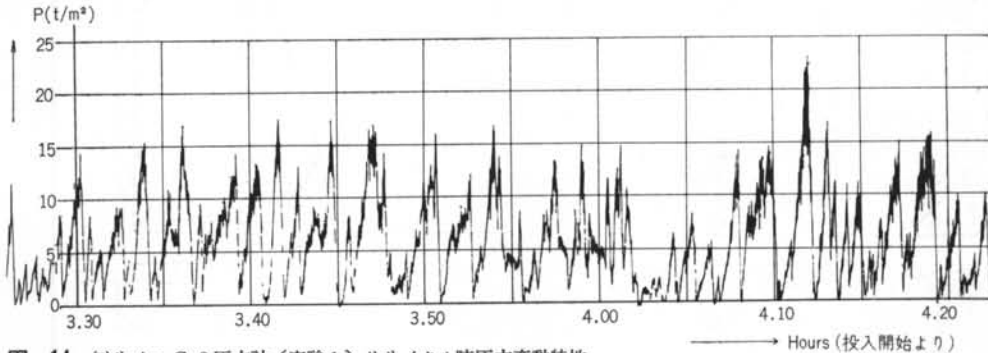


図-14 (B)サイロ C-2 圧力計(実験1)リサイクル時圧力変動特性

図-14に示す。この記録は、リサイクル開始6.5時間後の記録である。

この記録から、圧力変動が、ほぼ一定の周期による繰返しであることが見だせる。この周期は、ほぼ6~8分の周期である。

これは、サイロの抽出投入機構の運転速度にもよるのであるが、粉体そのものの流動特性を示すものとして、興味あるデータである。

圧力計 No.1 の記録によると、攪拌開始後1.5時間程は不規則な変動を示すが、それ以後は、こまかい変動を示しながら、ほぼ一定域内を変動している。攪拌時の最大側圧は  $7.5t/m^2$  である。

#### 実験2

攪拌開始後の記録を 図-6 に示す。

実験1の記録と同様、攪拌開始と同時に、圧力変動が

大きく増大している。

特に、測定圧力計の No. 2 と No. 3 は、圧力の増大が顕著である。攪拌開始後1.5~2.0時間の間に、圧力が急速に増大し、1つの頂点に達する。

先の2つの圧力計と比較して、サイロ底部にある圧力計 No. 1 と、上部圧力計 No. 4 は、小さな振幅で増大し、圧力の増加量もそれほど大きくはない。

圧力計 No. 3 の記録を、実験1の記録と比較すると、実験1の記録ほど明確な周期性を示していないが、ある程度圧力が増大すると急激に圧力が減少し、ほぼ20分~30分の周期で増大、減少が繰返えられる。

No. 2 は、先に述べたように、記録計のペンの走行が悪く変動特性が明確には、は握できないが、最大圧力は、No 3 の値と同様に、 $40t/m^2$  近くまで達し、振幅もかなり激しく、大きく変動したものと推定される。

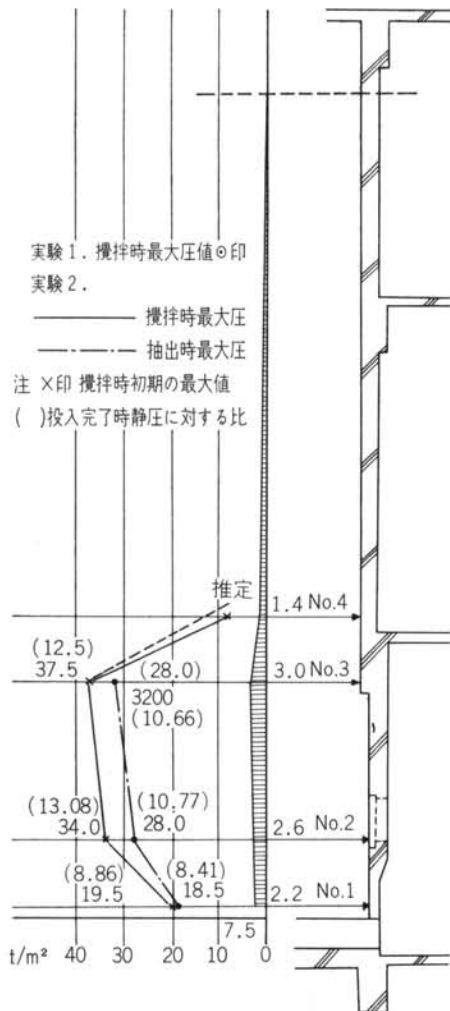


図-15 (A)サイロ動的圧力最大値包絡線図

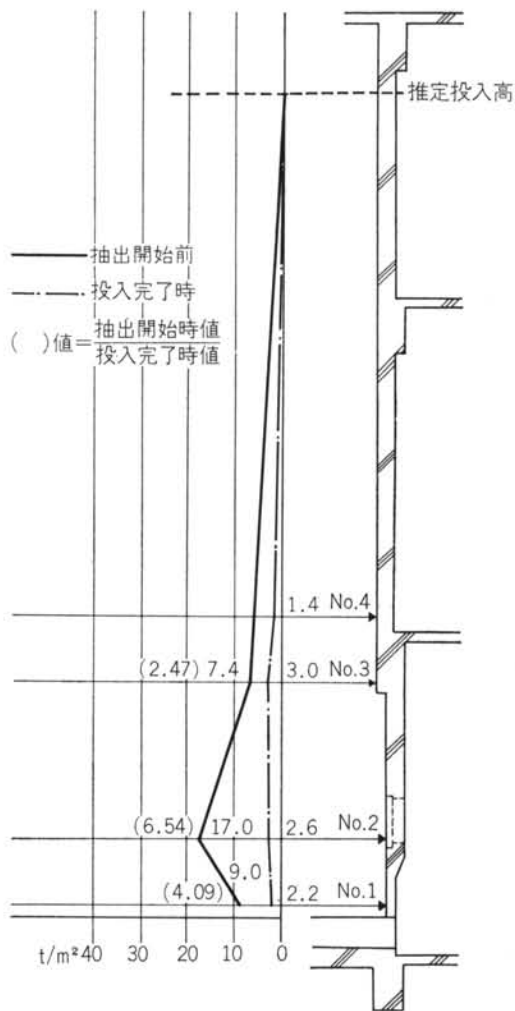


図-16 (A)サイロ(実験2)静的圧力分布図



No. 1 のゲージは攪拌時後半に振幅の増大が見られ、周期的な変動の波形が記録された。

この周期性の原因等については、考察の項で検討したい。

壁体に加わる攪拌時最大圧の分布を、図-15に示す。

攪拌停止後の各測定点の記録は、図-6、図-7 より段階的に低減していく。低減速度は、時間の経過とともに、順次に小さくなっていく。

抽出開始直前の壁体に加わる静的圧力を、投入完了時の静的圧力分布と比較して、図-16に示す。

### 3.3.2 (B)サイロについて

(B)サイロは、(A)サイロに比較して、突出部およびホッパー部を持つため、攪拌時の圧力変動の特性も、そのサイロの形状による影響がかなり大きいものと思われる、したがって、A、B、Cの各壁面ごとに、それぞれ特有の圧力変動が表われている。

攪拌時の各測点最大値図（各測点の最大圧を結んだもの）を図-17に示す。

#### 実験 1.

サイロ壁A面については、攪拌開始と同時に、急激な圧力増大を示した後、増大減少のこまかい変動を示している。

C面の突出部と同じ高さにある測定点A-3、A-2の圧力計の値が、比較的この壁面にては大きな値となっている（図-17参照）。特にA-3の圧力計は、最大圧と最小圧の差が、同壁面の他の圧力計のそれと比較して、かなり大きい。その変動量（振幅）は最大  $6.5t/m^2$  である。

壁面B面の圧力の変動特性を見ると（図-9）、ホッパー上部の測定点B-1は、ほとんど変動せず最大圧はわずか  $0.5t/m^2$  である。

すなわち、投入時と同様、ほとんど側圧が加わっていないことになる。

ホッパー部斜壁面上部であるにもかかわらず、圧力が小さな値であることは、注目すべきことである。これは対面の突出部の影響で、通常のホッパー付サイロに生じやすいとされている架橋現象（アーチ作用）が生ぜず、サイロの内壁の凹面部であるため、大きな側圧が生じなかったものと思われる。

B-2、B-3、B-4 ともに鋸歯状の変動を示している。しかしながら、その変動量は、 $2.0t/m^2 \sim 3.0t/m^2$  程度で、他と比較

して小さな変動量である。

壁面C面においては、突出部があり、その突出部頂端の圧力計C-2と、ホッパー部垂直壁面の圧力計C-1との攪拌時における圧力変動は、非常に大きく、振幅も大きく激しい。

圧力計C-2の攪拌時圧力変動特性の詳細を、自動記録計の記録から、図-14に示す。これより、圧力の周期的な変動と、変動量の大きさは把握できよう。

圧力変動の周期は、約1～2分であり、また、圧力の変動量は、平均約  $15t/m^2$  で、最大  $23.2t/m^2$  にも達している。

(A)サイロの圧力計 No. 3の記録（図-13）と比較してみると、(B)サイロの圧力変動の周期は、(A)サイロの周期の約  $1/3 \sim 1/4$  である。また、圧力の変動量は、(A)サイロの変動量の平均1.5～1.8倍の値となっている。

なお、この比較は攪拌時間が(B)サイロの方は短いので、最大圧値も最大変動量も、定量的に明確には把握できているとはいえない。しかし、この(B)サイロの突出部先端の圧力変動は、(A)サイロの測点 No. 3よりも、より急激で大きな、衝撃的な変動であるといえよう。

圧力計C-1の圧力変動は、圧力計C-2ほど明りような周期性もみられず、圧力変動量もC-2ほど大きく出てはいないが、最大圧力値は  $15.6t/m^2$  で、複雑な激しい鋸歯状の変動を示している。

圧力計C-4は、取り付け高さの等しい、他の壁面の

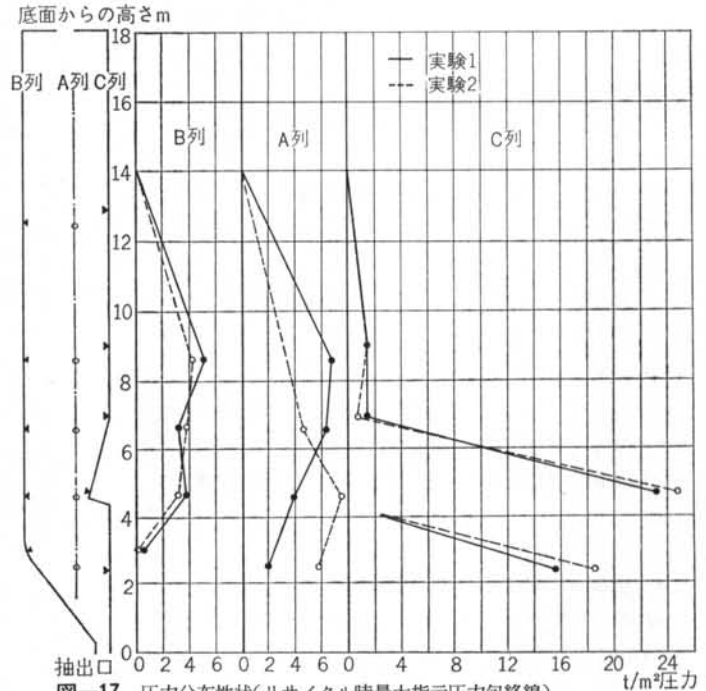


図-17 圧力分布性状(リサイクル時最大指示圧力包絡線)

圧力計の示した最大圧値と比較して、かなり小さい値を示している。

したがって、攪拌時においては、突出部上部の垂直壁面の側圧は、かなり小さいものといえる。

#### 実験 2.

攪拌を行なった時間が、実験 1 に比較して短いので、定性的には握しにくい点もあるが、実験 1 の結果と比較しつつ測定結果を述べる。

図一17に示すように、各測点の最大圧を比較すると、ほぼ同じ傾向を示している。

変動特性については、実験開始直後、各測点とも圧力の増減の激しい変動を見せているが、ほぼ20分ほどで、一応定常な規則的な圧力変動となる傾向をみせている。

サイロ壁A面については、測定点A-3の側圧の最大値が、実験1のそれよりも小さい値であるが、平均的な圧力は、実験1の記録より大きい。

A-1、A-2の各圧力計の記録も、実験1で示したそれぞれの値よりも大きい値を示している。

圧力計A-2は、攪拌開始後20分ほど圧力が増大し、ほぼ $4\text{t/m}^2 \sim 5\text{t/m}^2$ の近傍で、変動量 $2\text{t/m}^2$ 内外の鋸歯状の変動を示した。したがって、実験1の記録値より約2倍ほどの大きな値を示している。

A-1の記録についてみると、細かい変動がなくなり、最大圧 $5.75\text{t/m}^2$ に達している。最大圧は実験1のその約3倍である。

B壁面については、実験1と同様圧力計B-4の値が、B列については、一番大きな値を示している。最大圧は $4.15\text{t/m}^2$ で最大変動量は $3\text{t/m}^2$ である。

また、ホッパー上部の測定点B-1も実験1と同様に、圧力はほぼ零である。

各測定点の記録とも、こまかい変動を示さず、鋸歯状の変動形もみられない。平均的にB面での圧力は実験1と比較して、小さい値である。

C壁面における圧力変動は、実験1と同様に、C-2、C-1が大きく、C-2の最大圧は $24.8\text{t/m}^2$ である。またC-3もほとんど変動せず最大 $0.7\text{t/m}^2$ である。

しかし、C-1、C-2の圧力変動は、一般に振幅が大きくなく、変動量は $4\text{t/m}^2$ 内外である。また、明りような変動の周期性を見せていないが、鋸歯状の変動をみせている。

### 3.4 抽出時における圧力変動特性

抽出は、サイロより粉体を抽出すると同時に、袋詰(Sacking)を行なうので、ところどころで抽出を休止している。

#### (A)サイロについて

実験2の抽出時各圧力計の変動記録を図一7に示す。

いずれの圧力計も、抽出開始と同時に、急激な圧力変動を示す。No.3圧力計は、急激に圧力増加し、また急激は零近くまで減少し、その後も大きく変動しているが、袋詰の休止があるので、記録の上ではそれほどだつてはいない。

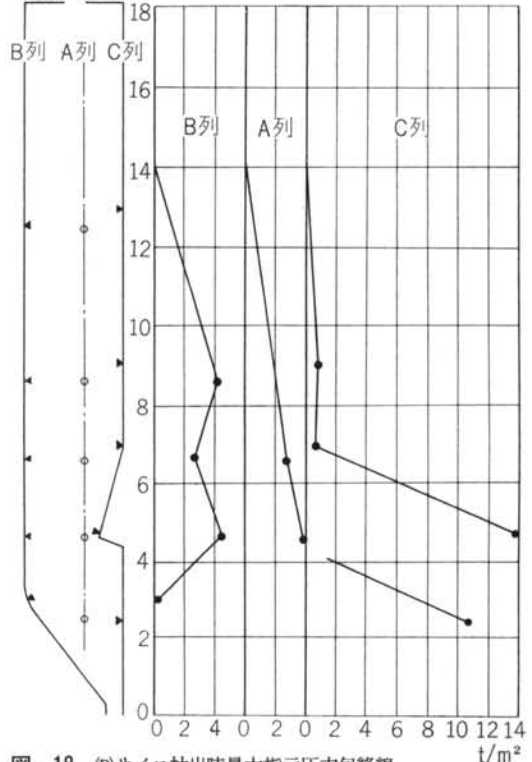
No.2圧力計は、1度圧力が減少してから増大する。なお、記録では変動の初期の頂点が平たんであるが、これは記録計のペンの走行不良によるものである。したがって、実際は、もっと圧力が増大し、変動も鋭く大きいものと想像される。

No.1圧力計は、鋸歯状の激しい変動を続けるが、変動の周期は短く、変動の振幅は $10\text{t/m}^2$ 内外であつて、攪拌終了時の静的圧力の近傍で増減している。

抽出時最大圧値包絡線図を図一15に示す。この分布状態が、攪拌時の最大圧値の分布に近似していることは、動的な攪拌、抽出時には、サイロ壁の各測点の最大圧の分布が、ほぼこのグラフで示す分布に近いことを示すものといえよう。

#### (B)サイロについて

抽出は攪拌に継続して行なつたため、抽出開始時の、



図一18 (B)サイロ抽出時最大指示圧力包絡線

急激な圧力変動は明りょうにはみられないで、攪拌時と同様の変動を示している、

また、抽出により粉体のサイロ内貯蔵量が減少しているにもかかわらず、各測点の取りつけ高さ近くに、貯蔵粉体のレベルが低下してくるまで、その測点の圧力の減少が現われないことは、注目すべき点の1つである。

抽出時の各測定点最大圧の分布状態を図-18に示す。

## § 4. 考 察

### 4.1 測定された最大圧力について

(A), (B)各サイロ測定点の投入、攪拌、抽出時の最大圧力値を表-3、表-4に示す。

測 点	実験1			実験2		
	投入時 静圧	攪 拌	抽 出	投入時 静圧	攪 拌	抽 出
No. 1	1.4	7.5(5.4)	—	2.2	19.5(8.4)	18.5(8.4)
No. 2	1.1	—	—	2.5	34.0 <sup>*</sup> (13.6)	28.0 <sup>*</sup> (11.2)
No. 3	1.2	28.0 <sup>***</sup> (23.3)	11.4(9.5)	3.0	37.5 <sup>**</sup> (12.5)	32.0(10.7)
No. 4	0.5	—	—	1.4	8.0(5.7)	—

実験1                      実験2  
( )は(動圧/静圧)を示す。  
<sup>\*</sup>最大値はさらに大きいものと考えられる。  
<sup>\*\*</sup>圧力計の塑性変形の影響を含む。  
<sup>\*\*\*</sup>推定値

表-3 (A)サイロ 投入 攪拌 抽出時における最大圧

測 点	実験1			実験2		
	投入完了時	攪 拌	抽 出	投入完了時	攪 拌	抽 出
A-1	0.25	2.0(8.0)	—	0.4	5.75(14.4)	—
A-2	0.8	3.9(4.9)	39.5(5.0)	0.95	7.5(7.9)	—
A-3	2.0	6.25(3.1)	2.8(1.4)	0.6	4.55(1.8)	—
A-4	1.4	6.75(4.8)	—	1.4	—	—
A-5	—	0.4	—	—	0.65	—
B-1	0.2	0.5(2.5)	0.3(1.5)	0.1	0.1(1.0)	—
B-2	1.75	3.7(2.1)	4.5(2.6)	1.5	3.15(2.1)	—
B-3	1.6	3.2(2.0)	2.85(1.8)	2.0	3.8(1.9)	—
B-4	1.45	5.05(3.5)	4.1(2.8)	2.2	4.15(1.9)	—
C-1	0.6	15.6(26.0)	10.7(17.8)	1.25	8.55(6.9)	—
C-2	3.5	23.2(6.6)	13.8(4.0)	6.1	24.8(4.1)	—
C-3	0.45	1.3(2.9)	0.6(1.3)	0.3	0.7(2.3)	—
C-4	1.15	1.4(6.2)	0.75(0.7)	1.05	1.4(1.4)	—
C-5	—	0.2	—	—	0.15	—

実験1                      実験2  
単位 t/m<sup>2</sup> ( )値は投入最大圧に対する比率。

表-4 (B)サイロ 投入 攪拌 抽出時における最大圧

最大圧値を比較すると、(A)サイロは圧力計の塑性変形量を差し引いても 35.5 t/m<sup>2</sup> であり、さらに圧力が増大したとも推定される。

(B)サイロは突出部に 24.8 t/m<sup>2</sup>、また突出部を除いても 15.6 t/m<sup>2</sup> と、ともに攪拌時に最大圧を示している。

この値は、後に再び述べるが、先回の投入物質が小麦(粒体)である時の最大圧値の実に 6.7 倍である。

次に各測定点の静的圧力値に対する動的圧力値の比、すなわち静的圧力値に対する変動量について検討する。

(A)サイロについては、各測定点とも 5.7~13.6 倍ほどのかなり大きな値を取っている。推定値であるが実験1では23.3倍ほどにも至っている。

(B)サイロにおいては、A、C両面ともにサイロ底部に近い方が投入時圧に対する攪拌時および抽出時の圧力変動量が大きいことを示している。また、B面はだいたい平均した圧力増大比を示しており、それぞれ2~3倍の変動量で他の面と比較して小さいといえよう。

図-15の動的圧力の各測定点最大値を結ぶ包絡線図を見ると、粉体の充填層高のほぼ1/3以下の高さの部分が最大圧のピークをなしている。これは先の小麦の測定の時と良く似た現象である。すなわち、ホッパー上部の円筒形部分の小麦充填層高の下より約1/3以下のサイロ壁が大きな圧力値を示しているのである。

(B)サイロにおいては、突出部があるためそれほど明りょうに表われてはいないが、図-17よりほぼ同様な傾向が表われているものといえよう。この事実は、今後の設計上に大きな示唆を与えるものといえる。

以上のように、われわれの初期の予想をはるかに越える大きな圧力が、サイロ壁体の側圧として作用するということは、非常に注目すべきことである。

われわれは本測定によって、このような高い側圧の発生を初めて知ったわけであるが、すでにドイツのサイロ設計技術者の間では、粉体(小麦粉)の抽出時には 20 t/m<sup>2</sup> 内外の圧力の発生は常識とされているとのことである。

しかも粉体の攪拌時にサイロ側壁に加わる圧力が、静的な圧力値の最高23倍にも達するという現象は、粉体の流動性と合わせて、今後さらに研究せねばならない。

### 4.2 粉体と粒体

今回の粉体による測定結果と先の粒体による測定結果<sup>1)</sup>と、比較検討をしてみる。

先の測定サイロを(C)サイロとして、表-5に測定データの大略を示す。

抽出速度やサイロ形状等の要因も含んでいるのであるが、一応測定結果を粉体と粒体とで比較してみる。

粒体(小麦)のサイロ壁体におよぼす最大側圧は、抽出時において、たかだか $5.6\text{t/m}^2$ であり、粉の場合の最大側圧の $1/6\sim 1/5$ である。しかも、投入総重量は300tであり、粉体の投入総重量の約5倍~10倍であることを考えると、粉体の流動時のサイロ壁体におよぼす圧力がいかに大きいかを理解されよう。

見掛比重も投入総重量も小さい粉体がこのような大きな側圧を生ずることは、先にも述べたように粉体そのものの流動時の特性をは握る必要性を示すものである。

粉体と粒体の攪拌、および抽出時の圧力の変動特性を、それぞれの流動化現象の表われの1つとして、比較してみる。もちろん、この圧力変動特性は、抽出速度や抽出方法等、抽出攪拌の機構のちがいが大きなファクターである。しかし、いちおう測定された記録上から、比較検討した値を、表-6に示す。

サイロ名	(C)	(A)	(B)
サイロ形状	円形鉄筋コンクリート製	角形鉄筋コンクリート製	角形鉄筋コンクリート製
サイロ高	20m (ホッパー部含)	14m	18.1m (ホッパー部含)
サイロ断面積	19.63m <sup>2</sup>	7.77m <sup>2</sup>	4.16m <sup>2</sup>
投入物質	小麦(粒体)	小麦粉	小麦粉
投入総重量	約300t	約60t	約30t
見掛比重	0.82	0.51, 0.42	0.51, 0.42
投入時最大側圧	2.25t/m <sup>2</sup>	3.0t/m <sup>2</sup>	3.5t/m <sup>2</sup>
抽出時最大側圧	5.6t/m <sup>2</sup>	32.0t/m <sup>2</sup>	10.7t/m <sup>2</sup> (凸出部 13.8t/m <sup>2</sup> )
攪拌時	—	37.5t/m <sup>2</sup>	13.8t/m <sup>2</sup> (凸出部 24.8t/m <sup>2</sup> )

表-5

サイロ名	(C)	(A)	(B)
投入物質	小麦(粒体)	小麦粉(粉体)	
平均抽出速度	50 t/hr	8.5t/hr	9t/hr
圧力変動周期	2~5秒	20~30分	1~2分
圧力変動量	1.5t/m <sup>2</sup>	7~8 t/m <sup>2</sup>	15t/m <sup>2</sup>

表-6 圧力変動値

先の報告では、上部にたい積した小麦は、2~5秒の周期で、段階的に流動する現象があり、この現象は、きわめて正確な周期で継続した。

図-13、図-14に、粉体の圧力変動の記録詳細を示したが、(A)サイロでは、かなり規則的な周期の圧力変動記録が得られ、(B)サイロでも、圧力変動の振幅にかなりのばらつきがあるが、ほぼ規則的な周期性を見い出せる。

したがって、いずれもかなりの規則的な周期の流動化現象があるものと推察できよう。

さて、圧力変動の周期を比較すると、粉体の圧力変動周期が、粒体のそれよりかなり長い周期である。

粉体の抽出速度と、攪拌時の攪拌速度が同じであるとすると、小麦の抽出速度は、粉体のその約5.5~6.0倍であるから、抽出速度の速いことが、小麦の変動周期の短い原因の1つとも考えられる。

しかし、機械の運転速度のちがいでだけには、あまりにも、その周期の時間に差が大きいと考えられる。また、圧力変動量の大きなちがいを考えあわせると、粉体と粒体との、それぞれの流動特性の違いが、大きな原因と考えられるのである。

### 4.3 粉体の流動特性について

#### 4.3.1 粉体のvault effect について

vault effect (せりもち効果)、(または arch action ともいう)については、すでに Reimbert 兄弟をはじめ幾人かの研究者により、粒体抽出時の圧力急増の原因として指摘されている。

Reimbert 兄弟は、vault effect について、次のように述べている。

抽出の際、抽出口上部のサイロ下部が、まず空になり、上部のアーチ状となった mass の下に、空洞を残す。その後、アーチの釣合いがこわれて、垂直のじょうご状のものが現われ、上部の粒体が、崩壊したアーチの下の空隙とじょうご状の部分埋めるように、底の方へ流れ込む。

すでに、実験目的にも述べたように、粉体は、粒度も細かく、粘着性もあり、含有水分も多い等の理由から、vault effect を、もっとも起こしやすいと考えられる。

再び図-13の、圧力変動記録の詳細図に注目すると、鋸歯状の形状を示した周期運動であるが、この変動記録が、圧力計 No.3 の近傍の、vault effect が生じていることを示すものといえよう。

vault が崩壊して、側壁への圧力が急激に減少し、その後、すこしずつの小さな圧力変動を繰返しながら、徐々に圧力が増大し、圧力が大きくなって、ある圧力に至り、アーチの釣合いを保てなくなると、急激にアーチがくずれするため、側圧も急激に減少する。再び、粉体が上部よりたい積し始め、少しずつすべりながらも、徐々に圧力増大する、という現象を繰返していると考えられるのである。

変動の周期と圧力の変動量が、ほぼ一定していることから、攪拌時に、この vault effect の形成崩壊の周

期運動を、反復繰返しているものと思われる。

図-14の、(B)サイロC-2圧力計のリサイクル時圧力変動記録からも、同様のことがいえよう。

圧力が、変動しつつ徐々に増大し、アーチを形成してゆき、ある圧力値に達して、アーチが崩壊し、圧力が急激に零近くまで減少する、という粉体粒子の運動を行なっていると考えられるのである。

したがって、(B)サイロ突出部頂点では、vault effectによる圧力増大のため、他のサイロ壁内のどの点よりも、大きな圧力値を示したといえよう。

このvault effect が形成されることは、粉体の流動が多かれ少なかれ小さな mass として流動し、流動する際には、1つ1つの細かい粉体粒子になって、サラサラと流動するのではなく、1塊1塊のかたまりとなって運動し、他の塊とぶつかってこわれる、という運動を行なっていると考えられるのである。

事実、われわれの(A)サイロの測定において、攪拌時の下向きの圧力によって、圧力計のコードおよびコード保護用のビニールパイプともどもひきちぎられて、断線したにが経験がある。

#### 4.3.2. サイロ内粉体粒子の運動領域と伝播について

容器底部の粉体流出口から粉体が流出している場合、容器内部には、粉体粒子の運動している領域と、運動していない領域とができることは、すでに粉体工学の研究者の間では良く知られていた。

R. Kvapil<sup>4)</sup>の研究によると、層高の大きなサイロでの実験では、容器出口近傍の粒子運動と、層上部の粒子運動とが、質的に異なっていることを示している。

東大、山下忠氏<sup>2)</sup>の報告によると、粉体の安息角の値と、運動領域の伝播の様式との関係について、いくつかの仮定条件のもとで、理論的な考察を試みておられる。その結論によると、安息角 $25^\circ$ 以上の粉体では、オリフィス開口後、粒子運動領域は、オリフィス上部に柱状に伝播する。また、安息角が $25^\circ$ 以下の粉体では、オリフィス上部から扇状に粒子運動領域が拡大し、安息角の値が小さいほど、この扇形の開き角度は大きくなると述べている。粉体粒子が運動している領域と、運動していない領域のできると考えられる現象は、圧力計の記録からも見い出せる。

3.3に述べたように、(B)サイロ突出部上部のC-3、C-4の圧力計は、ほとんど圧力は零に近い値であり、変動もほとんど示さない。C列の下2つの圧力計の動きと比較して、極端に対照的である。このことは、C列の突出部上部のサイロ壁近くの粉体はほとんど動かず、したがって、圧力の変動も生じないものと考えられる。

たまたま、(B)サイロは突出部を持つため、形状からくる要因とも考えられるが、先にわれわれが測定した、飼料用の角形鉄板サイロ<sup>5)</sup>(偏心ホッパーを持つ高さ14m断面 $2.43\text{m} \times 2.49\text{m}$ )での測定でも、同様の現象が見られたのである。

この粉体の流動特性の観察研究は、サイロ壁体に加わる動的圧力解明にぜひとも必要なものであると考える。

われわれも、現在モデルを作製中であり、今後もこの方面の研究を、継続してゆく計画である。

#### 4.4 抽出機構の違いについて

抽出機構は、(A)サイロには、ほぼサイロ底面全面にチェンベルトを設置し、それにより、測定壁方向に粉体をかき取る方式である。したがって、粉体は下部全体が一方に押し出されるかたちとなる。

(B)サイロでは、オリフィス下に、横式のロータリーを持ち、回転させて抽出する方法である。したがって、(A)サイロの抽出方法はサイロ底部側壁に、2次的な抽出機構による圧力が加わると考えられる。

事実、抽出および攪拌時のサイロ底部の圧力は、(A)サイロの方がはるかに大きな値を示している。また、圧力変動も大きく激しい。

このことは、(A)サイロの動的圧力の大きい原因の1つとして、この抽出機構による要因が指摘できよう。

#### 4.5 サイロ形状の影響について

(A)サイロは、測定点がサイロ壁一面にしかないので、しかも、測定点数も少なく、各壁面の圧力分布をつかむことができなかった。したがって、(A)、(B)、(C)サイロ間の比較検討は不可能である。

(B)サイロは、A、B、Cの各壁面の圧力変動を記録したが、(B)サイロの特徴である、突出部の影響と思われる現象がある。

1つは、先に述べたように、充填粉体量が減少するにもかかわらず、充填粉体面が、その測点の近くに降下してくるまで、圧力減少の傾向を示さないことである。

この現象は、(A)サイロ、(C)サイロにもみられない現象である。他の2つのサイロは、抽出にともなって、各測点とも、圧力減少の傾向を示している。

他の1つの特徴は、サイロ内壁の凹面の部分が、凸面の部分の圧力と大きな違いを、静的、動的、両方の圧力分布に示していることである。凸な部分は、このサイロの最大圧を示し、ホッパー上部や突出部上部と凹な部分は、ほとんど圧力を示さない。これは、サイロの形状がもたらす、興味ある結果であると思われる。

## § 5. むすび

サイロ壁体に加わる静的および動的圧力分布の性状については、多数の要因が複雑に交錯している。したがって、ここに述べた実測例は、それぞれ形も抽出方法も異なり、数少ない実測例であるので、この実験で得られた結果が、一般的なものであるといえないし、また、比較検討を行なうためのものとしては不適當であった。しかし、粉体サイロの挙動について、少しなりとも定性的な把握ができたのではないかと考えている。

粉体圧力を一般的な形では握するためには、模型実験によって検討を行ないたいと考えているが、一応、これら実測によって、粉体サイロでは、攪拌時および抽出時には、少なくとも  $20t/m^2$  以上の最大側圧が作用することがあり得るといふことと、今後の研究が必要であると結論を得たことに意味がある。

また、数多くの実物サイロ測定による、データ集積の必要性を痛感している。なお、サイロ壁体の動的および静的圧力分布におよぼす要因の今後の研究の問題点としては、次のことがあげられよう。

1. サイロ形状、規模および構築材料の、粉体および粒体の圧力変動におよぼす影響について；

イ) サイロの平面的な形状

ロ) 平面に対するサイロ高の比

ハ) ホッパー部を持つ場合と持たない場合。また、持つ場合には、ホッパー部の形状はどういう形状か(例えば、Eccentric hopper; off-center hopper; off-set hopper 等の形とその傾斜角や立体角の角度について)

ニ) オリフィスの位置と形状および大きさ

ホ) Pressure breaker 等圧力低減装置を設けた場合

ヘ) 鉄筋コンクリート製と鉄板製等の、サイロ構築材料の材質のおよぼす影響

2. 抽出機構の圧力変動におよぼす影響について；

イ) 抽出方法について(チェーン式、ロータリー式、エアースライド方式等のちがいについて)

ロ) 抽出速度

3. 投入物質の基礎的物性値の圧力変動におよぼす影

### <参考文献>

- 1) 高橋和男, 山原 浩, 内西二郎, 武田明男 光安 明: “サイロ壁体に加わる圧力分布の測定” 当研究所報 2号 1963年4月
- 2) 山下 忠, 森 政広: “粉体流量の制御に関する基礎的研究” 東大生産技術研究所報告 第17巻, 第1号 1966年11月
- 3) A.M. Turitzin: “Dynamic Pressure of Granular Material in Deep Bins” Proceedings of A.S.C.E., Journal of the Structural Division 1963年4月
- 4) R. Kvapil: “Theorie der Shüttgutbewegung” Veb Verlag Techn Berlin 1959年
- 5) 高橋和男, 磯畑 篤, 杉田 稔, 三谷勝之: “サイロ壁体に加わる変動圧の実測” 日本建築学会論文報告集 号外 1967年10月

響について；

イ) 粒度およびその分布

ロ) 粒子形状

ハ) 粉体および粒体の密度

ニ) 粉体および粒体の摩擦角特性

ホ) 粉体および粒体の付着力

ヘ) 粒子の含水特性

4. サイロ内の粉体および粒体粒子の流動性の圧力変動におよぼす影響について；(先の1, 2, 3, の総合的なものであるが)

イ) vault effect について

ロ) 粒子の運動領域と伝播特性について

ハ) その他

5. 静的圧力分布と動的圧力分布との関連性について；

イ) 粉体および粒体の静的圧力分布の理論式の検討

ロ) 動的圧力分布に関する理論的な究明と、静的圧力分布との関連性の有無について

6. 動的圧力増加の防止方法の究明；

いずれにしろ、今後は、まず粉体(粒体)のサイロ内での挙動を、以上の問題ごとに解析して、その総合的な結果として、サイロ壁体におよぼす圧力値の解明ができるのではなからうかと考えている。

## § 6. 謝 辞

今回の測定にあたっては、終始、昭和産業株式会社鶴見工場次長・大田秀人氏のご協力をいただいた。また、同工場Aミル粉サイロの測定にあたっては、同工場製粉課長・小須田昭夫氏、工務課長・川又美夫氏、工務課・井上信義氏のご協力をいただいた。

昭和産業株式会社船橋工場粉サイロの測定にあたっては、同工場次長兼製粉課長・柴田保夫氏、工務課長・伊藤清氏、工務課・水野谷勝正氏に、資料提供など、ご便宜をいただいた。

また、測定器具取り付けにあたっては、当社横浜営業所主任・熊井正道氏、千葉出張所主任・青柳慶之助氏、下浦康臣氏のご協力をいただいたことを付記して、謝意を表したい。