

## サイロ壁体に加わる粒体の抽出時圧力変動について

杉田 稔  
三谷 勝之  
磯 畑 脩  
高橋 和男

## § 1. はじめに

1.1 すでに、筆者らは、当研究所およびその他の文献において、粉粒体のサイロ壁体に加わる圧力分布について、実物サイロの測定結果に基づいて報告してきた。

前回までの報告では、従来のサイロ設計において、ほとんど考慮に入れられていなかった、抽出時の動的圧力について報告した。

実物サイロの測定結果によれば、それが、従来の古典的な Janssen の理論式による算定値より数倍も大きな値に達し、他の要因によっては、十数倍にも達することを報告した。

この抽出時の動的圧力がサイロ障害の1つの大きな問題点であることを指摘し、その要因について考察した。

1.2 本論文は、前報告に引続き、その後の粒体(小麦)用実物サイロの、測定結果の1つについて報告する。

この測定結果に基づき、粒体——特に、非付着性粒体(noncohesive granular materials)——の抽出時動的圧力の挙動について考察し、さらに、モデル実験に基づく、抽出時の流動パターンをもとに、1つの動的圧力値の算定式を提案し、それについて検討した。

## § 2. サイロ圧力測定概要

## 2.1 実験概要

今回報告する実験は、当研究所における一連のサイロ内圧測定の一環として、株式会社増田製粉所工務部のご協力をいただき、同社神戸工場の新設鉄筋コンクリート製サイロについて行なった。

本サイロの通常運転時における、投入物質小麦による投入、静置(サイロ内に貯蔵状態)および抽出時のサイロ壁面の側圧を測定した。

2回の実験において、投入速度および抽出速度を変化

させて、圧力分布および圧力変動を比較検討するため、各測点の圧力変動をそれぞれ投入時より連続記録した。

## 2.2 測定サイロ概要

測定したサイロの外観を写真-1に示す。(注、写真右側のサイロである)

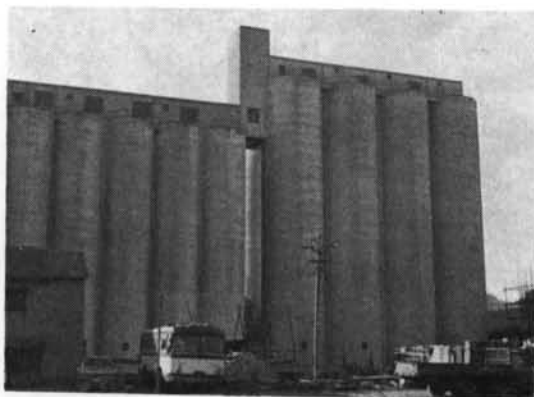


写真-1

本サイロは、当社設計施工によるもので、抽出時の動的圧力増大を考慮して設計され、清水式スライディング工法によって施工された原料サイロである。また、その気密性は特に優れている。

図-1に、サイロ平面図を示す。内径7.0mの円形サイロ8基と、3基の小サイロとから構成される。測定は、図-1に斜線を施した15番サイロについて行なった。

図-2に測定サイロの断面図および測定ゲージの取り付け位置を示す。

サイロ規模は、内径7.0m；サイロ壁厚200mm  
高さは、24.5m+3.9m(ホッパー部)=30.4m  
サイロ容量は、約990m<sup>3</sup>

ホッパーは、中央ホッパー (Center Hopper) 方式であって、傾斜角50°である。抽出口は直径450mmで、その上部に写真-2に示すような、くん蒸ガス放出用の Cross beam が取り付けられている。

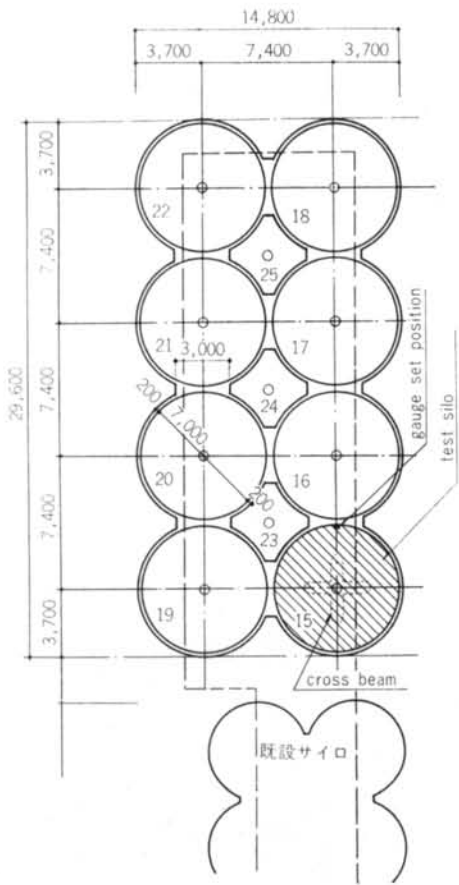


図-1 測定サイロ平面図



写真-2

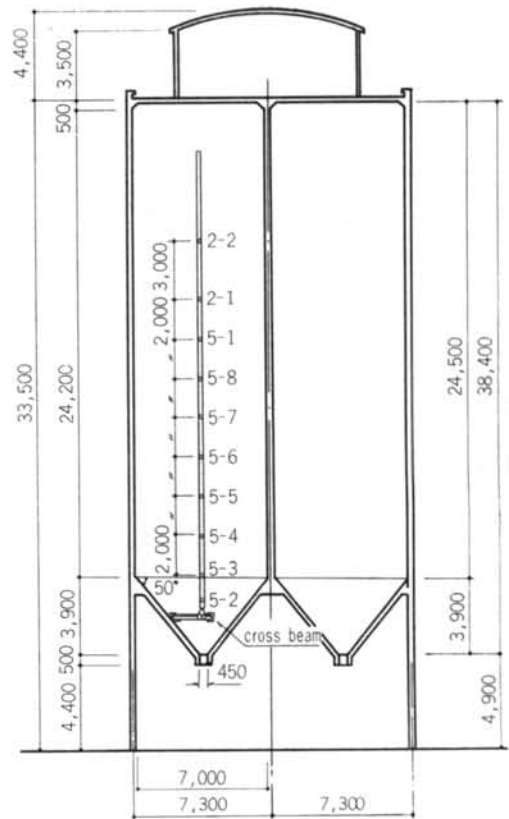


図-2 測定サイロ断面図 測定概要図

### 2.3 投入物質

投入物質は、非附着性粒体と考えられる小麦である。  
品名：(Red-SW-MN3)マニトバ・ノール産3号  
カナダ産の小麦である。

見掛比重：0.77

安息角(angle of repose)：約 $29^\circ$

投入総重量：約760 t

### 2.4 測定方法

1) 圧力測定位置：測定位置は、サイロ平面が点対称であるので、垂直に一列、図-2に示す10ヶ所である。すなわち、サイロ壁のたての圧力分布を測定した。

2) 圧力計仕様：抵抗線式圧力計を各測定点に取りつけ測定した。その定格容量は $2 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ と $5 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ のものであって、それぞれ測定点番号の最初の数字がそれを示す。受感部は直径70mmである。

3) 記録計：各圧力計の読みは、電子管式自動平衡式歪記録計のペン書き型および打点式型を用いて連続記録させた。なお打点間隔は30秒周期の打点記録である。

4) 圧力計取り付け：従来と同様、図-3に示すように、圧力計を取りつけたライトゲージを、圧力計および

コードのプロテクターとして、ウェジットにて測定壁面に取っつけた。

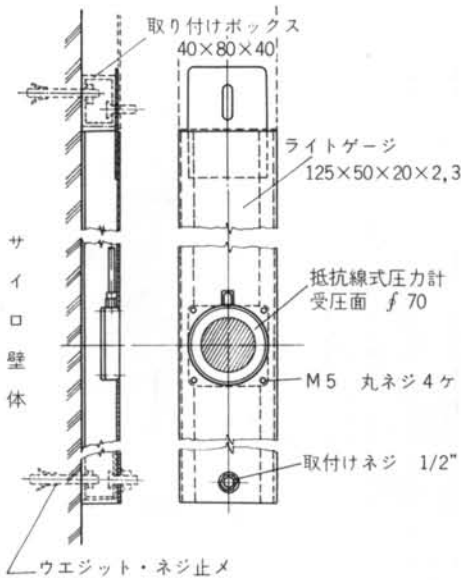


図-3 抵抗線式圧力計の取り付け詳細図

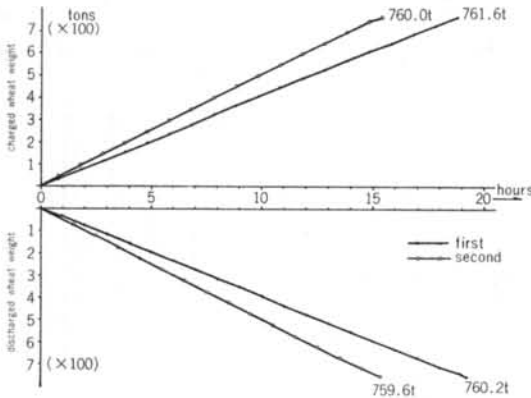


図-4 投入 抽出速度図

## 2.5 投入、抽出速度

実験中の小麦の投入重量および抽出重量は、ホッパースケールメーターによって計量された。その時間と総重量の関係を図-4に示す。

表-1に、投入総重量、所要時間および平均速度などを各実験ごとに示す。

	投入総重量	投入所要時間	平均投入速度	抽出所要時間	平均抽出速度
第1回実験	760.2 t	18時間50分	約 40t/hr	19時間15分	約 40t/hr
第2回実験	760.0 t	15時間15分	約 50t/hr	15時間20分	約 50t/hr

表-1

## § 3. 測定結果

3.1 第1回の実験は、先に示したように、投入・抽出の運転速度は平均毎時40 tである。

第2回の実験は、運転速度は平均毎時50 tである。

第2回の各測定点の連続記録を、図-5～図-8までに示す。連続記録は、測点の上部4測点(2-2～5-8)は打点式記録計にて記録し、他の6測点はペン書きにて記録した。

第2回目の実験では、静置時は圧力変動がほとんどないものと考えて、打点式記録計は測定を休止したため、静置時の記録はない。しかし、図-6にて明らかなように、抽出開始前の各測点の静圧力値は、投入終了後の値とほとんど変動していない。

抽出時に、ペン書き連続記録計に細かい圧力変動が記録されたが、サイロ内の小麦面に降りて観測した結果、サイロ内で、ズシリ、ズシリと低い音を発しながら、表面がわずかずつ沈下すると同時に、記録上に圧力の変動が記録された。したがって、小麦の抽出の間に、ある周期をもって小麦の質量が少しずつ沈下していくこと、その時に圧力計に小さな脈動があらわれることが判明した。このことについては後で詳しく述べたい。

### 3.2 投入時圧力変動について

1) 投入時圧力変動の記録では投入量に応じて徐々に圧力が上昇し、段階的に上昇してくる緩やかな動きである  
 2) 測点 5-3 のホッパーとの境界に設置した圧力計が、それより下部の測点 5-2 より圧力の上昇が早くから記録されているが、ホッパー上部にホッパー取り付け部のコンクリートの表面が階段状になっているため、投入口の位置とも関連して早くから小麦が堆積したものとされる。

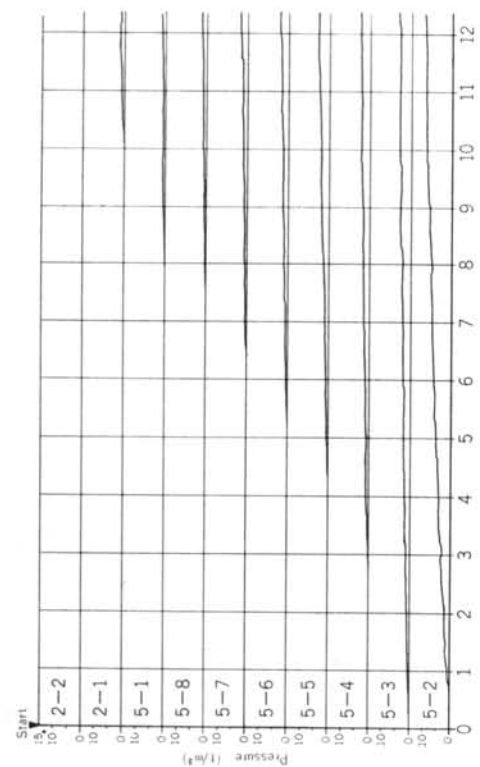
3) ホッパー部の斜面に取りつけた測点 5-2 は、圧力上昇の割合も大きく圧力値も大きな値を示している。

4) サイロ壁下部の測点では、圧力の上昇速度が徐々に低減し、ある一定圧力値に漸近する。

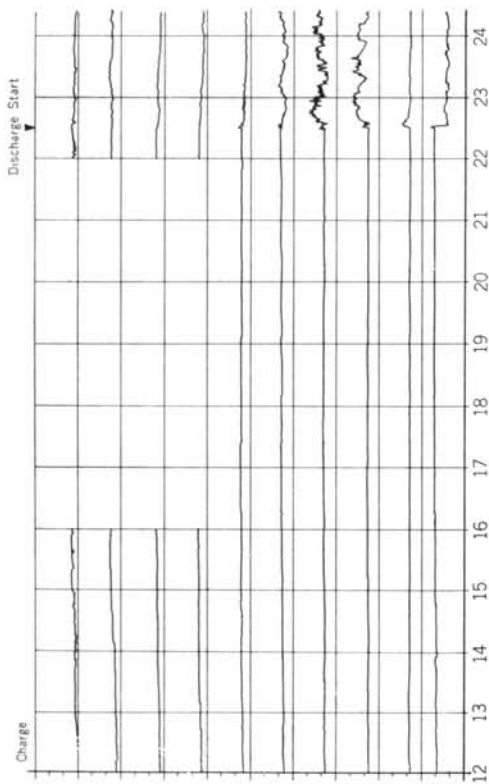
### 3.3 静置時圧力変動について

静置時間が比較的短時間であったが、圧力値の変動はほとんど無いといえる。しかし、圧力変動が生じる時には数点の測定点が同時に変動を示した。また、サイロ壁面の圧力値は、わずかながら減少する傾向を示した。

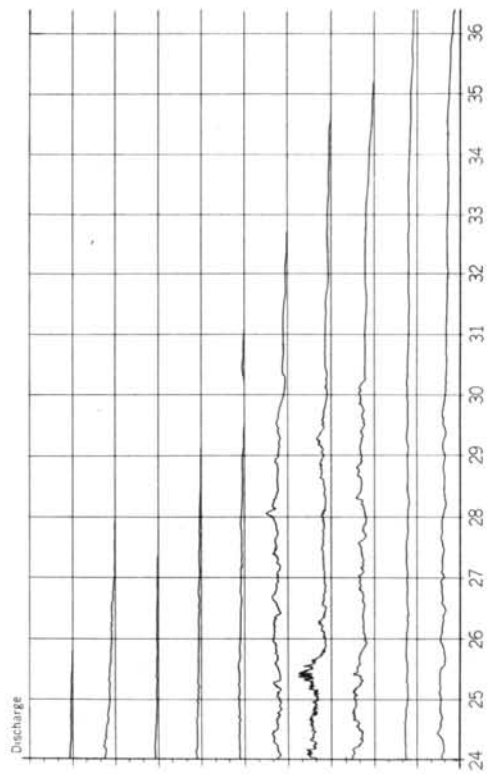
ホッパー上にある測点 5-2 は、逆に増大の傾向を示している。したがって、徐々にサイロ内で物質が下部に沈下して、しまっていく傾向を示しているといえよう。



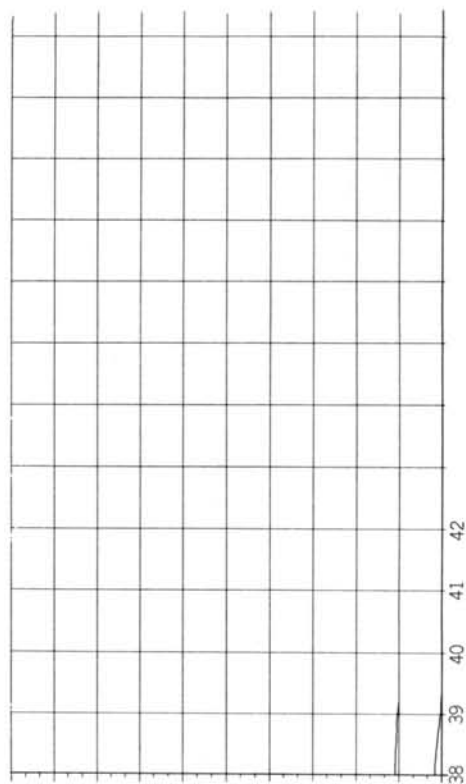
图—5 压力变动特性



图—6 压力变动特性



图—7 压力变动特性



图—8 压力变动特性

### 3.4 Janssen 理論値との比較

投入時および静置時の、サイロ壁に作用する圧力を「静的圧力値」と呼ぶ。第1回、第2回実験のこの静圧値の最大圧力値を、それぞれ図-9、図-10に示した。

次に、静的圧力値を Janssen の理論式を用いて算定した。なお算定には、次のような数値をもちいた。

- 小麦見掛比重  $\omega = 0.77$
- サイロ壁面の摩擦係数  $\mu = 0.33$
- 圧力係数 ( $P_L/P_V$ )  $K = 0.5$

算定結果を表-2に示した。また、その算定値を図-9、図-10に示した。

この算定値と測定された静的最大圧力値と比較すると、静的圧力値の最大圧値は、Janssen 式による理論値より若干大きな値を示しているが、静的圧力値は、ほぼ理論値に近似しているといえよう。特に、第1回の実験では良い近似を得ている。

### 3.5 抽出時圧力変動について

#### 3.5.1 抽出時圧力変動の特性

抽出時のサイロ壁に作用する圧力を「動的圧力値」または「動圧値」と呼ぶ。

抽出時の圧力変動の特性は、他の小麦サイロ測定および

**SILO JANSSENS THEORY OF PRESSURE**		
**MASUDA SEIFUN GENRYO SILO**		
A = 38.47	L = 21.98	
K = .5000	U = .3300	W = .7700
(A). CROSS-SECTIONAL AREA OF BIN.		
(L). THE INTERNAL CIRCUMFERENCE OF BIN.		
(K). COEFFICIENT OF PRESSURE.		
(U). COEFFICIENT OF FRICTION OF GRAIN ON THE BIN WALLS.		
(W). SPECIFIC GRAVITY OF GRAIN.		

HEIGHT (M)	PRESSURE (T/M <sup>2</sup> )
0.	0.000000
1.	.367409
2.	.701764
3.	1.006038
4.	1.282938
5.	1.534927
6.	1.764245
7.	1.972932
8.	2.162844
9.	2.325671
10.	2.492949
11.	2.626078
12.	2.766329
13.	2.884862
14.	2.992732
15.	3.090897
16.	3.180230
17.	3.261527
18.	3.335509
19.	3.402836
20.	3.464105
21.	3.519862
22.	3.570603
23.	3.616779
24.	3.658801
25.	3.697042
26.	3.731843
27.	3.763513
28.	3.792334
29.	3.818561

表-2 Janssen 理論による算定値

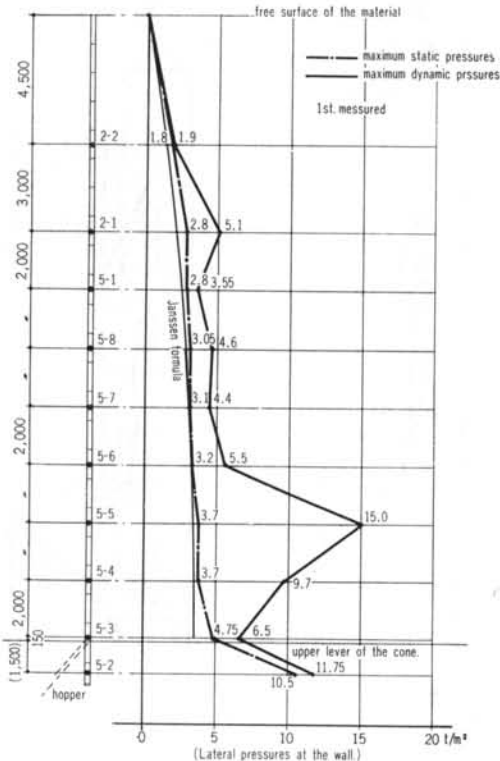


図-9 第1回測定 最大示指圧力値包絡線および最大静圧値図

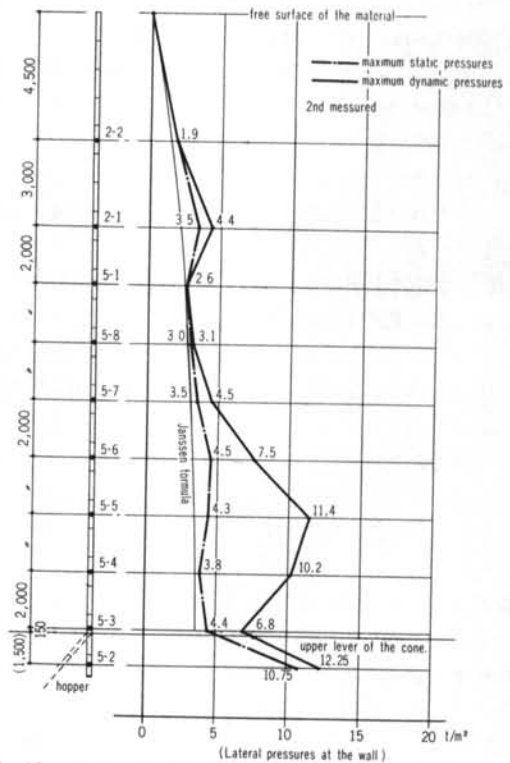


図-10 第2回測定 最大示指圧力値包絡線および最大静圧値図

び、今回の各測定点の抽出時圧力変動の連続記録から、その特性を大きく3部分に分けて考えることができる。

図-11 に、抽出時圧力変動記録の特性をモデル化して示した。

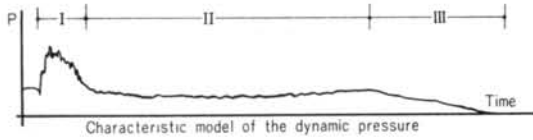


図-11 抽出時圧力変動特性モデル図

〔I〕 抽出開始直後

〔II〕 抽出開始後30分程後から、上部 $1/2$ ほどが抽出されるまで。(鋸歯状の激しい変動が見られる間)

〔III〕 鋸歯状の変動が見られなくなってから以後

〔I〕 抽出開始直後、全測定点で多かれ少なかれ変動を示す。多くの測点は、この間に最大圧力値を示す。

特に、ホッパー部を除くサイロ下部より $1/3$ までの近傍のサイロ壁には、大きな最大の圧力変動が見られ、その値は静圧値の3~4倍に達する。

また、ホッパー部は圧力が一時急激な変動後、静圧値の半分程まで圧力が低下する現象が表われる。

〔II〕 サイロ内で、ある定常な粒体の流動型が形成されるためと考えられるが、それぞれの各測点の圧力変動の特性がほぼ一定の内容を示してくる。

すなわち、サイロ円筒部の下 $1/3$ ほどの壁面では、激しい鋸歯状の変動が続き、変動の振幅も大きく、時にはこの部分で最大動圧値を示す測点もある。

他の測点では、静圧値の近傍ないしは、むしろそれよりも低い圧力値の近傍で、わずかな変動振幅で変動している。

〔III〕 すでに上部の圧力値は零となり、サイロ粒体の自由表面が半分ほどに低下してくるころ、激しく変動していたサイロ円筒部の下部 $1/3$ 程の各測点は、鋸歯状の圧力変動は示さず、なだらかな圧力変動を示し変動量もわずかである。

抽出量の増加とともに漸時圧力が低下する。しかし動圧値が零にいたる前に、一度なだらかな圧力上昇を示し、その後、零に達する変動特性を示す場合がある。

### 3.5.2 サイロ壁面高についての圧力変動の特性

サイロ壁面の高さ別による圧力変動の特性は、図-12に示すように、大略A~Dの四部分に分けて、その特性をとらえることができよう。

〔A〕 抽出開始直後、若干の圧力の急変増が一般に見られる。しかし、動圧値はほぼ静的圧力値の近傍で変動

しているがその変動量は小さい。

〔B〕 抽出開始とともに、急激な圧力の上昇と変動振幅の大きな鋸歯状の変動が見られる。抽出時最大圧値の示される部分である。

〔C〕 ホッパー部の上部で、サイロ円筒部下部のサイロ壁で、測点5-3がこれにあたる。

この点は、サイロ壁垂直断面での隅角部にあたるので、ほとんど圧力の変動は見られず、静置圧と等しい圧力値を示し、変動量は小さく、ほとんど変動しない場合もある。

〔D〕 ホッパー部の測点で、抽出開始とともに動圧値が急減し静圧値のほぼ半分ほどの値を示し、小さい振幅の圧力変動を示す。

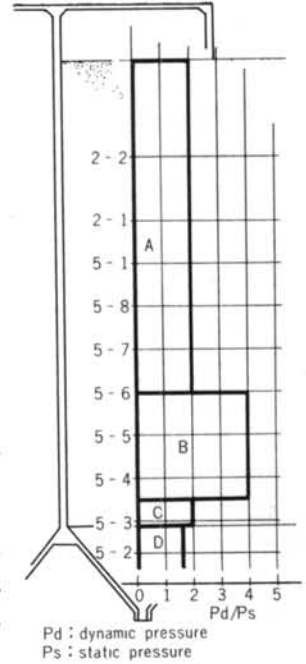


図-12 抽出時圧力変動サイロ高による特性

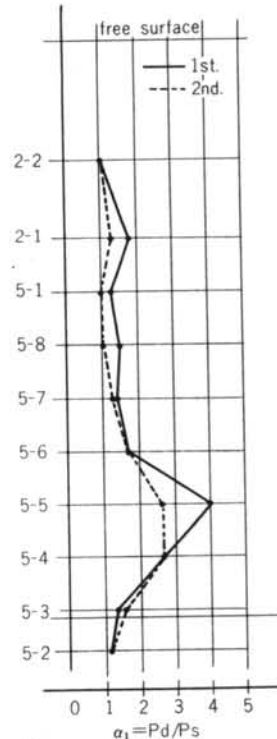


図-13

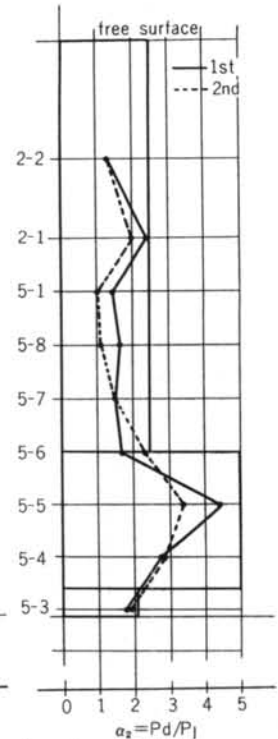


図-14

### 3.6 抽出時最大圧力値について

各測点の最大指示圧値包絡線図を、第1回、第2回の実験値それぞれを、図-9、図-10に示した。各回の測定圧の分布形状はほぼ同じ形状を示しているといえる。

第1回、第2回の実験とともに、最大圧力値は測点5-5に測定された。その値はそれぞれ  $15.0 \text{ t/m}^2$ 、および  $11.4 \text{ t/m}^2$  である。

各測点の最大動圧値 ( $P_d$ ) の、最大静圧値 ( $P_s$ ) に対する比 ( $\alpha_1$ ) を図-13に示した。

また、各測点高に対応する Janssen 理論値  $P_j$  に対する最大動圧値の比  $\alpha_2$  を図-14に示した。

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  ともに、第1回目の実験値の方が大きな傾向を示している。

図-13より、サイロ円筒部の上部約 $\frac{2}{3}$ の部分の測定点(2-2~5-6)では、 $\alpha_1$  の値は1.0~1.82の値を取

る。すなわち、 $\alpha_1 < 2.0$  の範囲が、先の3.5.2で示した[A]ゾーンに相当する。

また同様に、測点5-5~5-4は、 $2.0 < \alpha_1 < 4.05$ の値を示すこの測定部分が先の[B]ゾーンに相当する。

図-14に示した、対 Janssen 理論値との比  $\alpha_2$  の値では、だいたい各測定点とも  $\alpha_1 < \alpha_2$  の傾向を示す。

したがって、設計の段階で Janssen の理論式を用いて静的圧力値を算定し、その値に任意の安全係数  $\alpha$  を掛けた値を、抽出時に発生する動圧値として算定するとすれば、先の(3.5.2)節で述べた各ゾーンに分けて、図-14に示す  $\alpha_2$  の係数値を用いて発生する動圧値を一応算定できることとなる。

### 3.7 微小圧力変動(脈動現象)について

先に述べたように、ペン書き連続自記記録計には図-

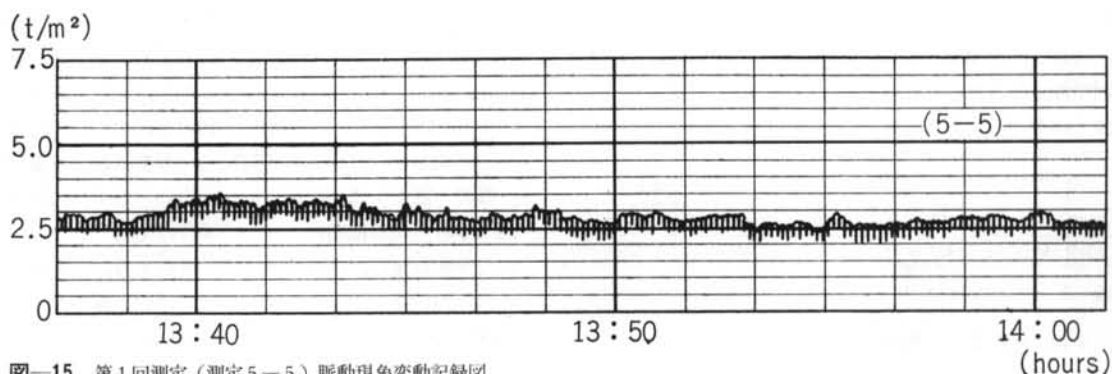


図-15 第1回測定(測定5-5)脈動現象変動記録図

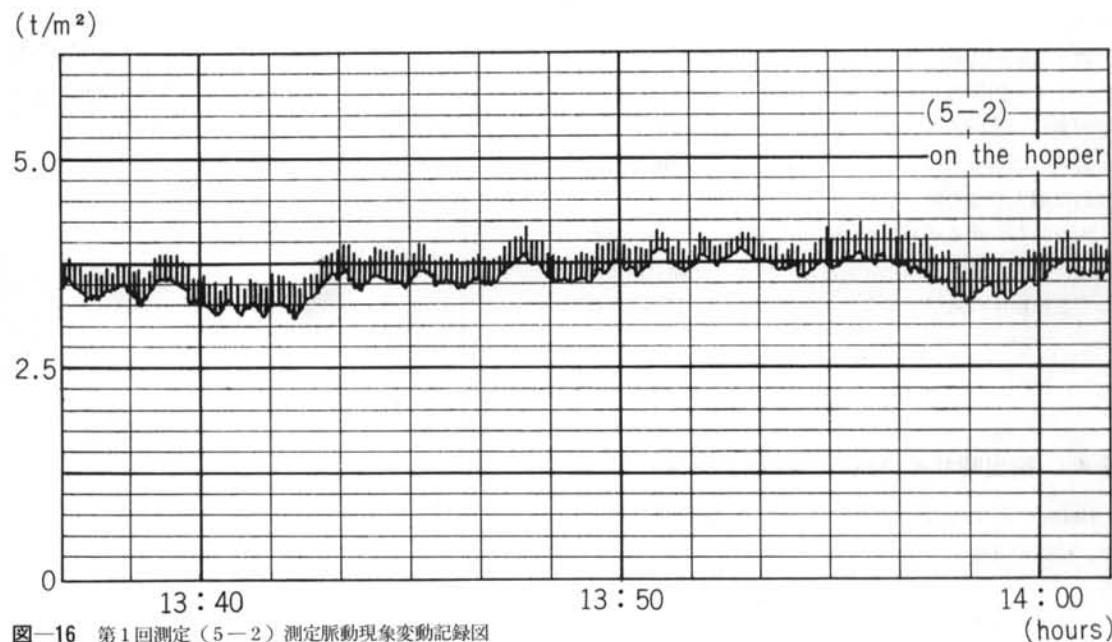


図-16 第1回測定(5-2)測定脈動現象変動記録図

15. 図-16に示すような連続する周期的な、細かい圧力変動を記録した。

この周期的な圧力変動は、抽出時に小麦の沈降現象ともなう周期的衝突と考えられる。この周期的衝突が同時に、サイロ壁に対する圧力上昇をともなう衝撃圧となって記録されたことが実験中に確認された。

このような微小振動は、当研究所がすでに測定した一連の粒体用（主として小麦）サイロでの実験でも記録観察された。（文1）

また、ソ連国立農業技術研究所、中央研究実験技師の N. Sorokin の論文にも文2)、同様の現象についての記述がみられる。

この周期的な微小現象は、ペン書き記録計にて記録させた各測点で、ともにほぼ同時にこの脈動現象を示している。第1回の測定では抽出開始50分後に表われ、また、第2回の測定では、抽出開始30分後に表われている。

これを抽出重量で示すと、表-3 に示すように、第1回の測定では抽出重量が約33 t、第2回の測定では、約25 t ほどで表われたことになる。

	平均抽出速度	変動振動数	変動周期	振動開始時刻	振動開始時抽出重量
第1回	40 (t/時)	462(回/時)	7.8 (秒)	抽出開始後50分	約 33 (t)
第2回	50 (t/時)	630(回/時)	5.7 (秒)	抽出開始後30分	約 25 (t)

表-3 脈動現象について

変動の振動数は、各測定点ともほぼ一致しており、第1回測定では毎時462回、第2回測定では毎時630回である。

微小振動の変動の方向は図-15、16-図に示したように、サイロ円筒部壁面の記録と、ホッパー部壁面の記録とで異なっている。円筒部壁面では、圧力が変動とともに瞬間的に減少する。また逆に、ホッパー部壁面では瞬間的に増大する変動を示している。

すなわち、サイロ上部では粒体の沈降によって、その壁面の圧力が瞬間的に減少し、逆にサイロ底部では沈降してきた粒体の衝撃圧によって上昇するものと考えられる。

#### § 4. 抽出時サイロ内の流動パターン

George P. Deutsch 等のモデル実験の論文<sup>文3)</sup>によると、粒体の流動パターンについて、次のように述べている。

粒体を抽出しているサイロ内の粒体の動きには、抽

出開始後しばらくたってから、定常な流動形態が表われてくる。その流動形は、粒体の自由表面がある高さには沈降するまで持続する。

われわれも、非付着性粒体の抽出時サイロ内の流動状態を研究するため、円筒形サイロを想定して、半円形断面のサイロモデルを用いて実験を行なった。

モデルは、実物サイロの約  $1/48$  の大きさで、直径20cmの半円形断面を持ち、高さ90cmである。一面をガラス張りにした鉄板製のものである。

実験材料としては、小麦を想定した非付着性粒体であるので、ほとんど完全球体である東芝研磨用ガラスビーズを用いた。実物サイロの径に対する小麦の粒径の比に近似させて、直径  $177\mu\sim 250\mu$  の球を用いた。このガラスビーズの比重は約2.52である。

実験は、ふるいを通して自由落下により堆積させて、約10cmピッチにほぼ同じ粒径の鉄粉を用いて、黒い線状の縞を作り（写真-3）、自然落下による抽出方法で抽出し、流動パターンを観察した。

抽出口径を各種変化させて実験したが、今回は直径6mmおよび12mmの抽出口径を用いた時の写真を、それぞれ、各時間を追って示す。（写真-3～写真-40）写真-3～写真-22までは抽出口径12mmの場合の実験で、写真-23～写真-40は抽出口径6mmの場合の実験である。

抽出開始直後に、ほぼ抽出口径の垂直上方に、流動化する部分が伝播していく。その伝播していく高さは、抽出口径の大きさによって異なり、抽出口径の小さいほど高くおよぶ。しかし、ある任意の高さまでその流動化現象が伝播すると、サイロ内に、ある一定の流動パターンが形成される。その流動パターンとはモデル実験の写真にて示したように、図-17に示すような図式化によって表わせる。

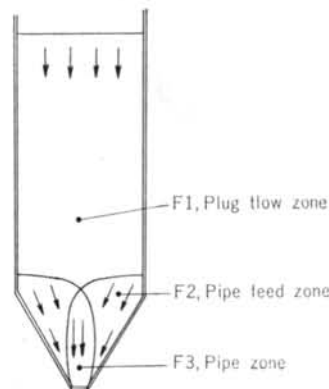


図-17 抽出時流動パターン



図-17で示した各部分について説明する。

(F1)部;(Plug flow zone)は、サイロ壁面との境界部に残留する部分(a boundary layer effect と呼ばれる)を除いて、粒体は一樣な速度で沈降する。すなわち、任意断面上の粒体は、同一水平面を保持しながら沈降していくと考えて良い。これは、特に抽出口径の大きい場合の実験では明瞭に判明する。(写真-10等を参照)

(F2)部;(Pipe feed zone)は、これに達した粒体は、中央線方向の求心速度を持って中心部に向かって流れ込む流動帯である。

(E3)部;(Pipe zone)は、粒体が垂直に抽出口に向かって落下する部分である。

図-17は、ホッパーで区切っているが、写真ではホッパーがついていないモデルであるので、全然流動しない部分(Dead zone)が存在する。しかし、この(Dead zone)と(F2)部との境界は明瞭であって、この角度にホッパーを設けると、全部が残留せずに抽出できることとなる。(写真-22)

先に、図-12で示した[A]域は、(F1)部に相当し、[B]域は、(F1)部と(F2)部の境界部が含まれ、上部より沈降してきた粒体が崩壊し、衝撃圧を生じ、すべりだす部分であって、常に衝撃的な圧力が繰り返し発生する部分である。

ここでわれわれは(F1)部と(F2)部の境界面を「崩壊面」と名付ける。この崩壊面は、抽出開始時には定常流が形成された時の崩壊面の位置より高い位置にあり、やがて、定常流動状態になると、そのレベルは下がってきて、一定の位置に表われる。やがて抽出が進み、物質の自由表面がある高さに達すると、この崩壊面は再び高くなって、落下してきた自由表面に達し、(F1)部がなくなり、崩壊面は消滅する。(写真-19)

したがって、崩壊面にて発生する衝撃圧の大小はあるが、その衝撃圧の発生する部分の崩壊面の高さは、流出形態によって、すなわち、抽出総重量によって移動するものであると考えられる。しかし、移動するといっても、先に述べた[B]域を出ることはまず無いものと、実験記録およびモデル実験からも確認される。

現在実験中であるが、モデル実験によって示されたように、流動パターンは抽出口径の大きさ、物質の特性(形状、粒径等)によって多少変動することが判明した。

特に、崩壊面の生ずる位置は、抽出口径の大きさ、すなわち、抽出速度にも影響される。

## § 5. 脈動現象についての考察

### 5.1 抽出量と脈動現象との関係

以上述べてきたことから、サイロ内の粒体の脈動現象は、定常な流動形態が形成されると表われ、一定の周期を持っていることと、抽出速度が一定であることとは、密接な関係があると考えられる。この抽出量と脈動現象との関係について若干考察してみたい。

抽出時の脈動現象周期、5.7秒~7.8秒の時間内に、サイロ内に空隙が生じ、それが沈降する物質によって満たされていくと仮定することができよう。

図-4より、抽出速度(単位時間あたりの抽出量)が一定であると考えて良いから、各図の脈動あたりの抽出量をサイロ内の変動量に等しいと考えられる。

先に述べたように、定常な流動形ができた後では、(F1)部では、粒体がサイロ断面で一樣に水平に沈降してくるから、脈動中の粒体の流動する面積は、近似的にサイロ断面積と考えて良い。

ここで	
脈動の振動数	..... $n$ 回/時
抽出速度	..... $W$ t/時
サイロ断面積	..... $A$ m <sup>2</sup>
小麦比重	..... $\gamma$

とする。

脈動の周期  $T$  秒の間に、抽出される小麦の重量  $\omega$  t とする。

$$\omega = W/n \text{ ..... (1)}$$

と表わせる。

第1回実験	..... 変動振動数	$n_1 = 462$ 回/時
	抽出速度	$W_1 = 40.0$ t/時
第2回実験	..... 変動振動数	$n_2 = 630$ 回/時
	抽出速度	$W_2 = 50.0$ t/時

である。(注:添字は実験の回数を示す。以後同様とする)

(1)式から

$$\omega_1 = 40.0/462 = 0.0866 \text{ t/回}$$

$$\omega_2 = 50.0/630 = 0.0794 \text{ t/回}$$

脈動1回あたりの降下する粒体の高さ  $h$  は次式で表わされる。

$$h = \omega/A\gamma \text{ ..... (2)}$$

ここで、小麦の見掛比重はサイロ内で流動しているときも変化しないものと仮定して、 $\gamma = 0.77$  として算定すると

$$A = 38.47 \text{ m}^2 \quad \gamma = 0.77 \text{ を(2)に代入して、}$$

$$h_1 = \omega_1/A\gamma = \frac{86.6 \times 10^3}{38.47 \times 10^4 \times 0.77} = 0.29 \text{ cm}$$

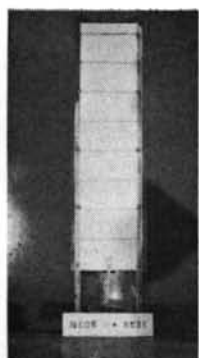


写真-3 抽出開始前

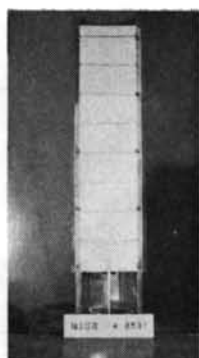


写真-4 抽出開始0'04"

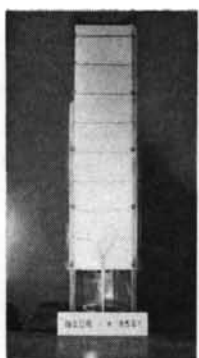


写真-5 0'08"

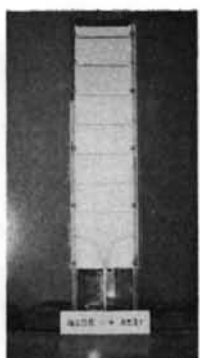


写真-6 0'17"

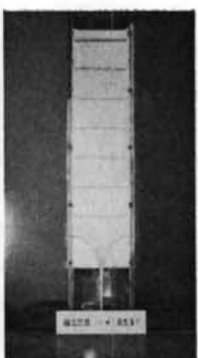


写真-7 0'30"

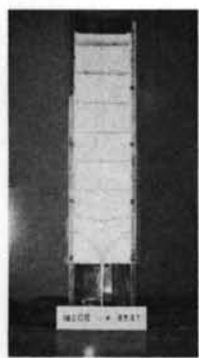


写真-8 0'50"

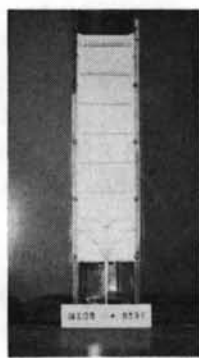


写真-9 1'00"

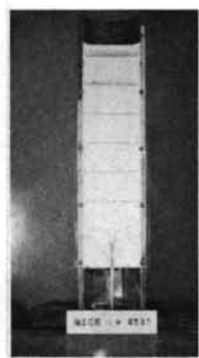


写真-10 1'10"

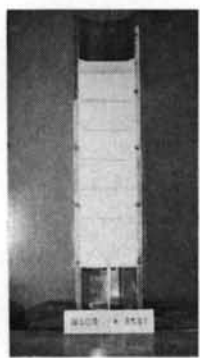


写真-11 2'00"

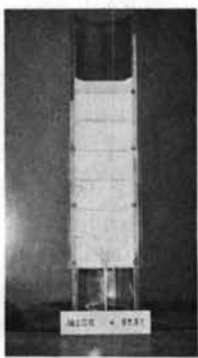


写真-12 3'00"

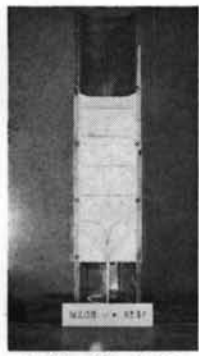


写真-13 4'00"

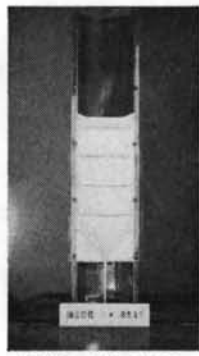


写真-14 5'00"

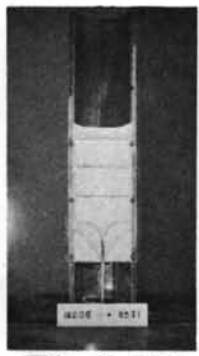


写真-15 5'30"

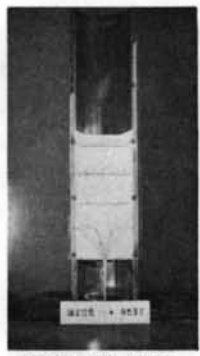


写真-16 6'00"

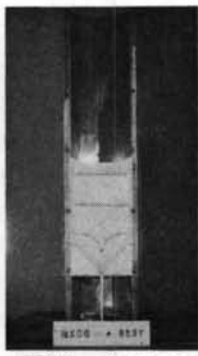


写真-17 7'00"

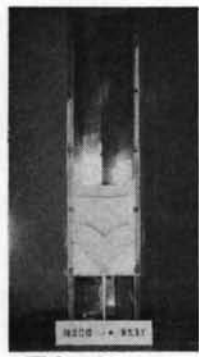


写真-18 8'00"

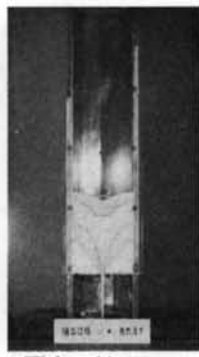


写真-19 8'30"

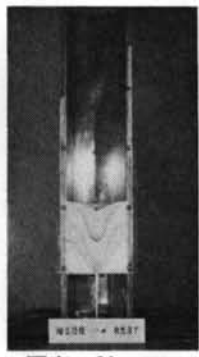


写真-20 9'00"

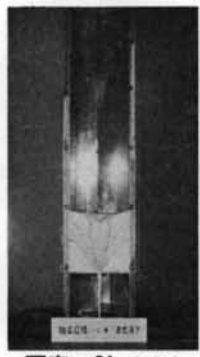


写真-21 9'30"

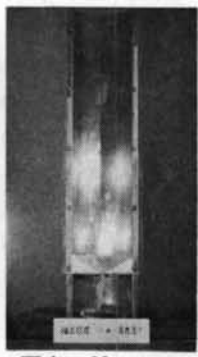


写真-22 11'45"

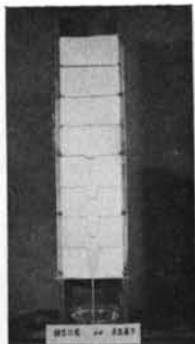


写真-23 抽出開始0' 20"

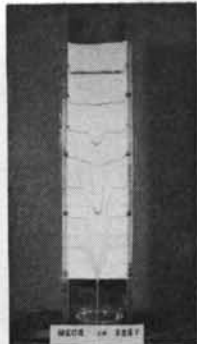


写真-24 3' 00"

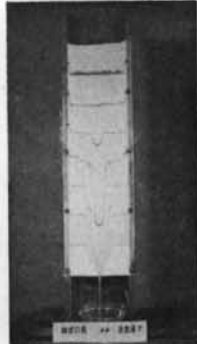


写真-25 4' 00"

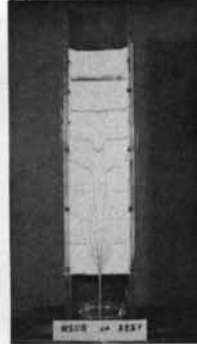


写真-26 6' 00"

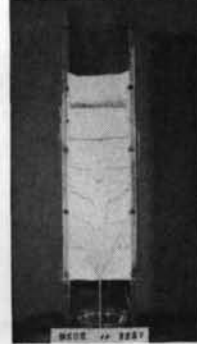


写真-27 12' 50"

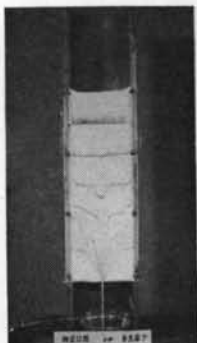


写真-28 15' 50"

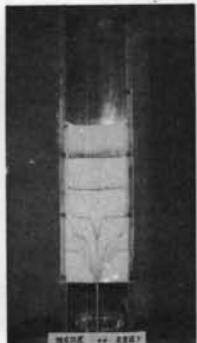


写真-29 23' 50"

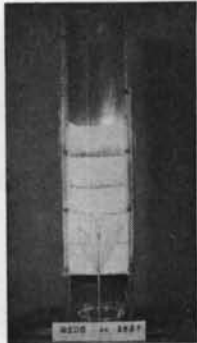


写真-30 24' 50"

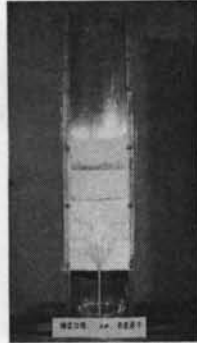


写真-31 29' 20"

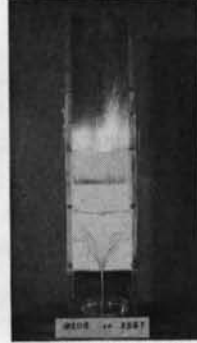


写真-32 32' 50"

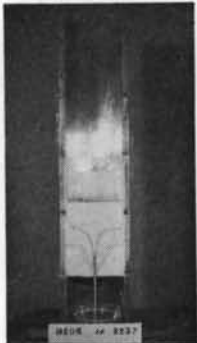


写真-33 36' 20"

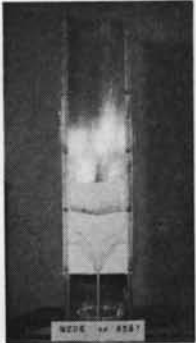


写真-34 39' 50"

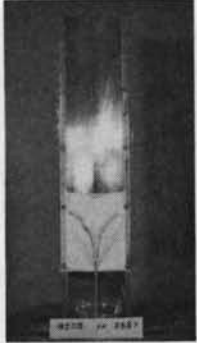


写真-35 43' 50"

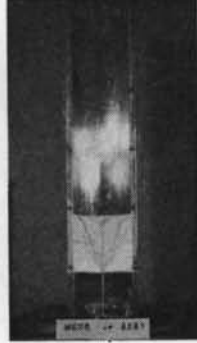


写真-36 49' 20"

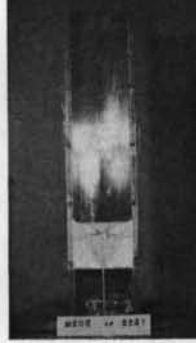


写真-37 52' 20"

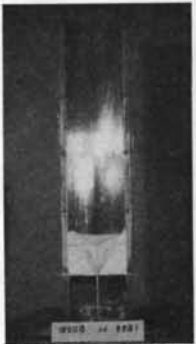


写真-38 53' 50"

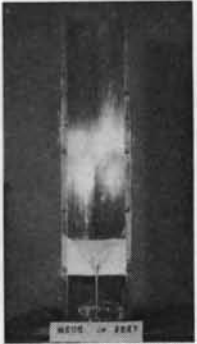


写真-39 55' 50"

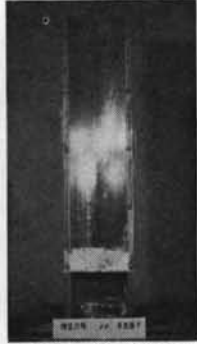


写真-40 60' 20"

$$h_2 = \omega^2 / A\gamma = \frac{79.2 \times 10^3}{38.47 \times 10^4 \times 0.77} = 0.27 \text{ cm}$$

N. Sorokin の論文によれば、エルツ市のサイロ調査において、直径 6.0 m の円形サイロにて小麦を抽出速度 60 t/時 で抽出した際、脈動の一定周期 5~7 秒で、各脈動時の沈降高は算定すると 0.55 cm である。

したがって、脈動現象は抽出速度による若干の変動があるうがいたい同様の周期と沈降高であるといえる。

## 5.2 脈動現象と平均圧力

先に述べたように、定常流動化したサイロ内の粒体は (F1) 部内では、粒体は水平を保って沈降してくる。そこで、この (F1) 部の粒体が連続したものとして、一様に沈降してくるものとする、この (F1) 部においては Janssen 理論式におけると同様に、堆積高さによる垂直応力の影響が、圧力係数 (水平圧力の垂直圧力に対する比) 分だけ水平圧力には表われてくるはずである。

すなわち、抽出量が増加して粒体の堆積高さが減少していくにつれて、各測点 (特に Plug flow zone 内) の水平圧力は減少していくことになる。

しかし、今回の 2 回の実験およびわれわれの行なった過去の実験における連続記録においても、この (F1) 部に相当する点の側圧は抽出量が増加し、堆積高が減少するにもかかわらず側圧は低減せず、ある一定の圧力値の近傍を変動しつつける現象を示した。また、多くの測点は粒体の自由表面が測点近くに沈降してきてから、逆に圧力上昇を示し、急激に減少する傾向を示している。

以上の連続記録の定性的な性状から、抽出時に粒体の流動パターンが定まり、定常流動となった時の (F1) 部を以下に述べるように考えることができる。

(1) 粒体の自由表面から数メートル下がった部分に、それから上部の粒体の垂直圧力成分を支持する、アーチ作用をする不連続部があって、それが粒体の堆積高が減少しているにもかかわらず、逆に圧力の上昇を生む原因と考えられること。

(2) (1) に述べた、不連続部から崩壊面までの (F1) 部の間は、図-18 に示すようにいくつかの不連続面によって、上下両境界面で他の粒体と不連続になり、水平に輪切りにされたようなピース状になって一様に沈降していくと考えられる。すなわち、この部分では垂直方向の応力が不連続となって、垂直方向の応力成分の影響を無視できるものと仮定する。

以上の実験結果に基づく 2 つの仮定から、この (F1) 部内での自由表面からある高さ下がった部分以下の、サイロ壁に作用する平均的水平圧力を算定する。

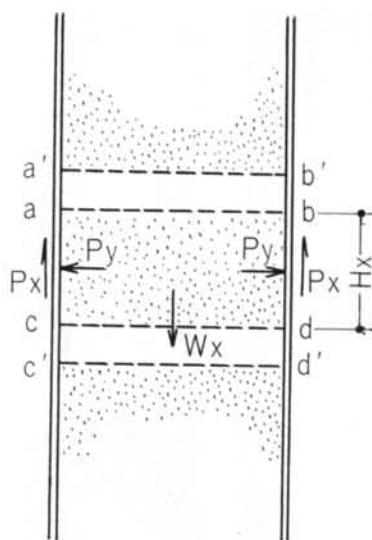


図-18

図-18 に示して、平行に輪切りにされた粒体のかたまりが、上下の境界 a, b, c, d で不連続となって落下するものとする。

粒体のピースの a, b, c, d の重量  $\omega_x$  は、図-18 に示す落下するピースの高さを  $H_x$  とすると以下の式で示される。

$$\omega_x = A \cdot H_x \cdot \gamma \dots \dots \dots (3)$$

ところで、 $\omega_x \cdot H_x$  の間には

$$\omega_x = \omega \frac{H_x}{h} \dots \dots \dots (4)$$

が成立する。

いま、ピース a, b, c, d の力の釣り合いを考えると、粒体の重量はサイロ周壁の摩擦力で釣り合う。

サイロ周長  $\dots \dots \dots L$

周壁単位面積あたりの摩擦力  $\dots P_x$

とすると、

$$P_x = \frac{\omega_x}{L \cdot H_x} = \frac{\omega}{L \cdot h} \dots \dots \dots (5)$$

サイロ壁面と粒体との摩擦係数  $\dots \dots \dots \mu$

サイロ壁面に直角に作用する水平力  $\dots P_y$

とすると、

$$P_x = \mu P_y$$

$$\therefore P_y = \frac{P_x}{\mu} = \frac{\omega}{\mu \cdot L \cdot h} \dots \dots \dots (6)$$

したがって、定常流動状態の (F1) 部内の不連続部でサイロ壁に作用する水平圧力として  $P_y$  を考えることができる。

(6) 式より、各実験時の値を求める。ここで、壁面との摩擦係数を静的摩擦係数と等しいとすると、 $\mu = 0.33$

$$P_{y1} = \frac{86.6 \times 10^3}{0.33 \times 21.98 \times 0.29 \times 10^2} = 0.424 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{y2} = \frac{79.4 \times 10^3}{0.33 \times 21.98 \times 0.27 \times 10^2} = 0.405 \text{ kg/cm}^2$$

定常流動中の(F1)部の不連続部分の壁面に作用する水平圧力として、

実験1, 抽出速度 40.0 t/時  $P_{y1} = 4.24 \text{ t/m}^2$

実験2, 抽出速度 50.0 t/時  $P_{y2} = 4.05 \text{ t/m}^2$

が得られた。

次に実験中に得られた派動現象を、その平均圧力と脈

動の変動量とを、各測点ごとにその連続記録から読みとって、プロットしてみると図-19に示す。

(F1)部と(F2)部の境界、すなわち、粒体の崩壊面は、得られた連続記録から考察すると、第1回の実験時には測点5-4の近傍に相当し、第2回の実験では測点5-4~5-5の間と思われる、

第1回の実験では5-5~5-7部が、第2回の実験では、5-6~5-7部が(F1)部に相当しよう。

実験値の平均圧力値は、先の仮定に基づく算定値と多少バラツキはあるが、ほぼ一致するとみて良い。

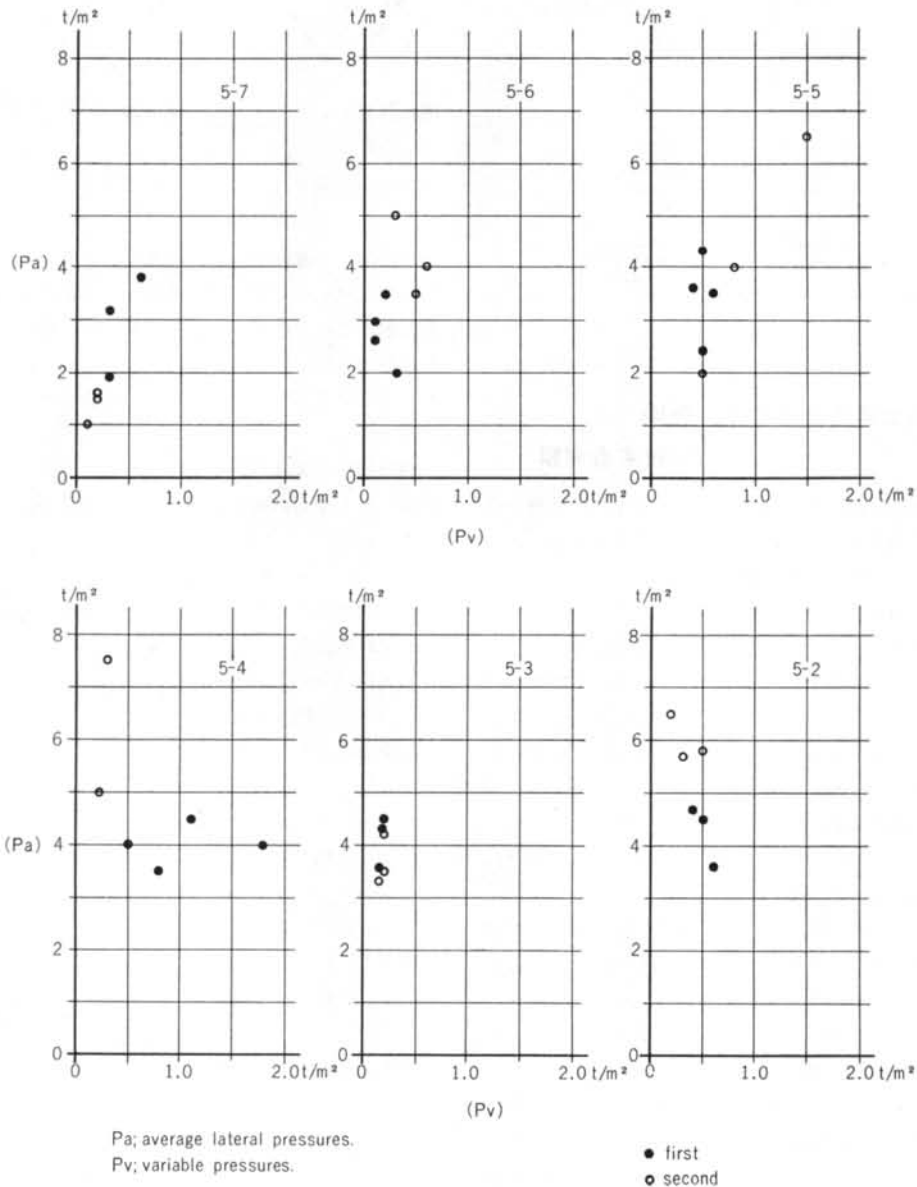


図-19 脈動現象平均圧力値と変動圧力値の現象

連続記録からも、だいたい算定値と実験値とに大きな差異は無いといえる。

脈動現象の最大変動振幅の分布を図-20に示す。この図から、崩壊面で大きな圧力変動の生じていることが理解できよう。

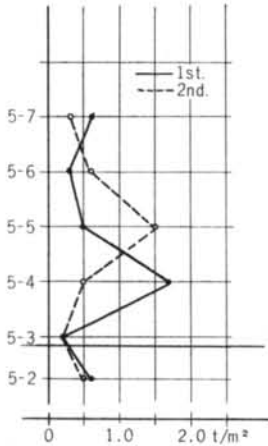


図-20 脈動現象の最大変動量分布図

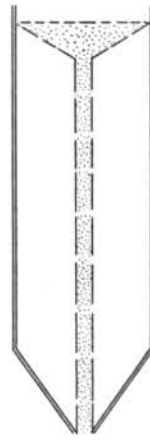


図-21 Rat-hall 現象

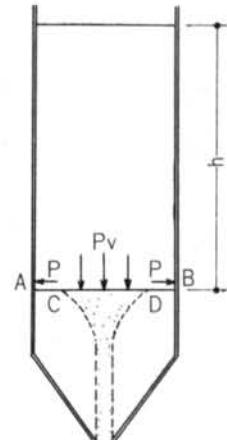


図-22

### §6. 抽出開始直後の圧力急増 に対する考察

抽出開始直後に、サイロ壁全体に作用圧力の急激な変動と増大が表われることについて、先の3.5.1にて述べた。また、抽出開始直後に抽出時の最大圧力値ともいえる大きな圧力が、サイロ円筒部の下部に発生することについても述べた。したがって、サイロ設計にあたっては、この最大圧力値を算定することが、1つの問題点である。

そこで、実験による結果から以下に述べるような方法にて最大圧力値を算定した。

まず、抽出開始時のサイロ内粒体の流動パターンは、モデル実験でも判明するように、上層部では全然みだれずに一様に沈降している。

したがって、抽出開始時には、まず一様に堆積した粒体では、図-21に示すような「Rat-hall 現象」と呼ばれる流動パターンは生じないものと考えられる。そこで、抽出開始後のサイロ内の粒体の状態を、次のように仮定することができる。

図-22に示すように抽出開始後に、ある堆積深さ  $h$  m の粒体面  $a b$  に、瞬間的な不連続部分  $C D$  が発生すると考えられる。この瞬間的に不連続となる  $C D$  部分の面積を  $A' (m^2)$  とする。この  $A'$  をサイロ全断面積  $A (m^2)$

の  $\alpha$  倍とすると、

$$\alpha = A'/A \dots\dots\dots(7)$$

瞬間的な不連続現象が、境界  $C D$  で発生する時、静的な垂直圧  $P_V$  の  $C D$  面での成分は、力の釣り合いから、瞬間的なアーチ作用を生じて、 $a b$  面の単位幅の壁面での摩擦力となって流れたと仮定する、この仮定にしたがって、不連続が生じたための、二次的な摩擦力を算定してみる。

瞬間的な不連続の発生する深さを 実験の際、抽出開始時に最大圧力の発生した測点(5-5)の深さとする。すなわち、

$$h = 17.5 \text{ m}$$

抽出開始前に作用していた静的な垂直圧力値を、先の Janssen 理論式を用いて求める、

$$h = 17.5 \text{ m の水平圧値} : P_L \text{ は、}$$

$$P_L = 3.3 \text{ t/m}^2$$

圧力係数 :  $K = 0.5$  より

$$P_V = P_L / K = 6.6 \text{ t/m}^2$$

したがって、 $C D$  部の垂直圧 :  $P_V'$  は

$$P_V' = P_V \cdot A' \\ = P_V \cdot \alpha \cdot A \dots\dots\dots(8)$$

サイロ周長 :  $L$  より、 $a b$  面での単位幅あたりの二次的摩擦力 :  $P_f'$  を求めると、

$$P_f' = P_V' / L \\ = P_V \cdot \alpha \cdot A / L \dots\dots\dots(9)$$

サイロ壁と小麦との摩擦係数 :  $\mu = 0.33$  として、二次的的水平圧力 :  $P_L'$  を求める。

$$P_L' = P_f' / L \\ = P_V \cdot \alpha \cdot A / (L \cdot \mu) \dots\dots\dots(10)$$

いま、ホッパー部に設置した測点(5-2)の連続記録

に注目すると、抽出時に瞬間的に静圧値より減少し、そのままほぼ一定圧値を示している。

この測点は、垂直圧の成分を受けているので、この圧力減少を不連続面の形成によって減少した垂直圧の割合に等しいと仮定する。この仮定によって、 $\alpha$ の値を定めるものとする。

第1回、第2回の測定より、 $\alpha = 0.3 \sim 0.4$ となる。

そこで、(10)式を用いて算定すると、

$$\alpha = 0.3 \cdots P_L' = \frac{6.6 \times 0.3 \times 38.47}{21.98 \times 0.33} = 10.5 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.4 \cdots P_L' = \frac{6.6 \times 0.4 \times 38.47}{21.98 \times 0.33} = 14.0 \text{ t/m}^2$$

したがって、瞬間的な圧力値の増大は、10.5~14.0 t/m<sup>2</sup>となる。

この値は、測定によって得られた値に、ほぼ等しい値を示している。したがって、以上に述べてきた考察によっても、抽出開始時の最大圧値を、近似的に算定できるものとする。この際に、不連続面の自由表面からの深さ  $h$  と、 $\alpha$  の仮定値をいかにして求めるかの点が問題として残る。しかしながら、 $h$  の仮定にあたっては、不連続面が図-12に示した[B]域を出ることはなく、また、 $h$  の値の多少の変動によっても、垂直圧  $P_V$  の値は、Janssen 式の特性から、それ程大きな変化はない。

したがって、最大圧値を(10)式から求めるとすると、 $\alpha$  の値をいかにして決定するかにある。今後の数多くの実験より裏付けを必要とするが、サイロの大きさ、抽出方法、粒体の物性等の要因によって若干の変動があっても、ほぼ0.3~0.4の値を取るものと想定される。

次に、いくつかの実物サイロの測定例に、この算定式を適用してみた。

当研究所で測定した、2つの小麦サイロと、ソ連の N. Sorokin の論文による測定結果とに適用した。

(1) Aサイロ：(当研究所測定)

サイロ規模：内径5.0m、高さ20.0m、

中央ホッパー式鉄筋コンクリート製円形サイロ

測定結果：抽出時最大測圧

$$h = 15.0 \text{ m} \cdots P_{\text{max}} = 5.6 \text{ t/m}^2$$

理論式による算定： $\mu = 0.33$ ,  $K = 0.5$  として

$$h = 15.0 \text{ m} \cdots P_L = 2.7 \text{ t/m}^2$$

$$P_V = 5.4 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.25 \cdots P_L' = \frac{5.4 \times 0.25 \times 2.5}{0.33 \times 2.0} = 5.11 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.3 \cdots P_L' = 6.14 \text{ t/m}^2$$

(2) Bサイロ：(当研究所測定)

サイロ規模：5.66m × 5.38m(角形断面)

高さ26.9m

本サイロは、抽出口が3個あり、中央の1個を開口した場合の結果について適応する。

測定結果： $h = 16.0 \text{ m} \cdots P_{\text{max}} = 7.70 \text{ t/m}^2$

理論式による算定： $\mu = 0.33$ ,  $K = 0.5$  として

$$h = 16.0 \text{ m} \cdots P_L = 2.92 \text{ t/m}^2$$

$$P_V = 5.84 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.3 \cdots P_L' = 7.33 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.33 \cdots P_L' = 8.06 \text{ t/m}^2$$

(3) Bサイロ：(抽出口三個を全開にした場合)

測定結果： $h = 19.5 \text{ m} \cdots P_{\text{max}} = 12.9 \text{ t/m}^2$

理論式による算定： $\mu = 0.33$ ,  $K = 0.5$  として

$$h = 20.0 \text{ m} \cdots P_L = 2.92 \text{ t/m}^2$$

$$P_V = 5.84 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.4 \cdots P_L' = 10.4 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.5 \cdots P_L' = 13.0 \text{ t/m}^2$$

(4) Cサイロ：(N. Sorokin の論文から、エルツ市の

小麦サイロの測定結果)

サイロ規模：内径6.6m、高さ30.0m

中央ホッパー式鉄筋コンクリート製円形サイロ

投入物質：小麦

測定結果： $h = 23.0 \text{ m} \cdots P_{\text{max}} = 8.24 \text{ t/m}^2$

理論式による算定： $\mu = 0.33$ ,  $K = 0.5$  として

$$h = 23.0 \text{ m} \cdots P_L = 2.8 \text{ t/m}^2$$

$$P_V = 5.6 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.3 \cdots P_L' = 7.56 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.35 \cdots P_L' = 8.4 \text{ t/m}^2$$

以上の実物サイロに適用した結果、抽出口が大きい場合、すなわち、抽出速度が大なる時、 $\alpha$  の値も大きくなるが、通常の規模のサイロでは、ほぼ $\alpha$  の値が0.3~0.4の範囲で、実測値と良く近似している。

## § 7. まとめ

以上考察に述べてきたことをまとめてみる。

- ・静的圧力値については、Janssen の理論値と実験値はほぼ一致している。若干、実験値が大きめに出ているが、この差は理論値算定時の各仮定値の取り方に原因があるものと考えられる。しかしながら、まず実用上は問題がないものとする。
- ・抽出時圧力変動については、変動の特性に3つの違った特性が見られた。また、この変動特性は抽出時のサイロ内の、粒体の流動パターンと密接に関連すると考えられる。特に、抽出開始30分ほど後から、脈動現象

がみられることは注目する点である。

- ・抽出時の圧力変動は、サイロ壁面の各位置によってその変動の性状が異なり、4つの特性がみられる。これも、サイロ内粒体の流動型と結びつけて考えることができる。
- ・モデル実験の結果からも、抽出時の動的圧力値は、Plug flow zone の粒体が沈降してきて崩壊し、流動化する崩壊面に最大圧力を生じ、また、大きな変動圧を生ずるものと考えられる。この崩壊面での粒体の沈降による衝撃圧が脈動現象となって表われ、抽出速度によって一定の脈動周期を持つ。
- ・崩壊面は抽出速度により、また、堆積している粒体の重量により、上下に移動するものと考えられるが、定常な流動パターンが形成されると、図-12に示した[B]域を出ることはない。
- ・定常流動している崩壊面より上部の粒体は、垂直方向

の応力成分を無視して算定した水平圧力値と、測定により得られた平均圧力値と良い一致を示している。

- ・抽出速度の差異による影響は、定常流動の状態での脈動現象の周期と最大変動量を示す部分、すなわち崩壊面の高さの違いとなって表われている。

## 謝 辞

今回の測定にあたっては、株式会社 増田製粉所 取締役技師長 後藤俊夫氏、同工務部長代理 中井 晃氏、他諸氏のご協力のご指導をいただいた。ここに、厚く御礼申し上げます。

また、当社大阪支店設計部課長 光安 明氏、神戸営業所 瀬戸秀雄主任、他現場各氏のご協力もいただいたことを付記して謝意を表したい。

## <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) N. Sorokin: “サイロからの排出時の穀物の動圧力の計算”
- 3) G.P. Dentsch: “Flow and Pressure of Granular Materials in Silos” A.S.C.E Vol.93, No.EM 6 Dec.1967
- 4) A.W. Jenike, J.R. Johanson: “Bins Loads” A.S.C.E Vol.94, No. ST 4 Apr.1968
- 5) 杉田稔, 三谷勝之, 磯畑脩, 高橋和男: “サイロ壁体に加わる粉体圧力分布の測定” 当研究所報10号 1967年4月
- 6) 杉田稔, 三谷勝之, 磯畑脩, 高橋和男: “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
- 7) 杉田稔: “サイロ壁体に加わる粒体の抽出時圧力変動について” 日本建築学会論文報告集 号外 1968年10月