

## 4.2 サイロ壁面に作用する粉体圧

### 4.2.1 粉体圧に関する研究と設計基準

サイロの壁面に作用する粉体圧（以後粉体圧という）は、サイロの形状、サイロ内容物の物性、内容物の投入・排出条件、アーチング現象、リサイクルに伴う攪拌などの条件によってその大きさが決まるといわれている。

この粉体圧については、古くから多くの研究がなされていて、その理論および実験結果をサイロ構造物の設計基準に適用してきたが、多くのサイロの破壊事故例などから粉体圧は単に静的圧力状態だけでなく、内容物の流動時（投入および排出時）に生ずる動的圧力状態をサイロの構造計算に考慮しなければならないとして設計基準の見直しが行われている。

粉体圧に関する理論は大別して土圧論に基づくものと、粉体を弾塑性体と考えた歪エネルギー理論に基づくものがある。前者は Janssen, Reimbert, C'equot などによる理論であり、後者は Jenike などの理論である。

現在、各国で採用されているサイロ構造物の設計基準では、そのほとんどが土圧論に基づく粉体圧に実験および経験による修正を加えたものが採用されている。

しかし、今なお多くの研究がなされている。今回は都合により本書で紹介できなかったが、Jenkyn は土圧論における側圧係数や内部摩擦係数について、新しい観点から提案しているのもその一つである（R. T. Jenkyn, "Calculation of material pressures for the design of silos", Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 2, 1978）。

したがって、今後ともより合理的な粉体圧算出手段の改良が期待できる。

### 4.2.2 粉体圧各論

本項では、粉体圧の理論式ならびに各国で採用されている設計基準の特長について若干述べることにする。

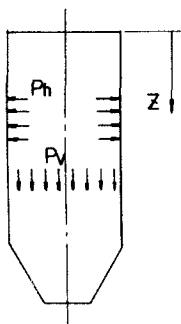


図 4.2.1

(a) Janssen 理論式

$$p_v = \frac{\gamma \cdot A}{\lambda \cdot \mu \cdot U} \left[ 1 - e^{-\lambda \cdot \mu \cdot U \cdot Z / A} \right]$$

$$p_h = \frac{\gamma \cdot A}{\mu \cdot U} \left[ 1 - e^{-\lambda \cdot \mu \cdot U \cdot Z / A} \right]$$

ここに、A = サイロうちりの面積

U = サイロうちりの周長

$\gamma$  = 内容物の単位体積当り重量

$\lambda$  = 側圧係数 (=  $p_h / p_v$ )

$\mu$  = サイロ壁面摩擦係数, ただし内容物間での摩擦係数  $\mu_0$  ( $= \tan \phi$ ) より大きい場合はこの  $\mu_0$  とする。

$\phi$  = 内容物の内部摩擦角

$p_v$  = 深さ  $Z$  における水平単位面積当りの垂直荷重。

$p_h$  = 深さ  $Z$  における壁面に作用する水平荷重。

本式は粉体の静的圧力表示であって, 上記側圧係数と粉体の内部摩擦角との間に次の関係があるものとする。

$$\lambda = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$$

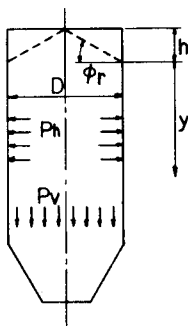


図 4.2.2

(b) Reimbert 理論式

$$p_v = r \left[ y \left( \frac{y}{c} + 1 \right)^{-1} + \frac{h}{3} \right]$$

$$p_h = p_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{y}{c} + 1 \right)^{-2} \right]$$

ここに,  $y$  = サイロ深さ

$h$  = サイロ上部の積み高さ

$\phi_r$  = 内容物の安息角

$c$  および  $p_{\max}$  はサイロ形状による定数であって, たとえば直径  $D$  の円形サイロの場合は下記のようになる。

$$p_{\max} = \frac{r \cdot D}{4 \cdot \mu}$$

$$c = \frac{D}{4 \cdot \mu \cdot \tan^2(\pi/4 - \phi/2)} - \frac{h}{3}$$

本式も粉体圧の静的圧力表示である。

(c) Caquot の理論式

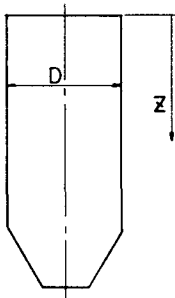


図 4.2.3

$$p_v = \frac{r \cdot D}{4 \cdot \mu} (1 - e^{-z/b})$$

$$p_h = \frac{r \cdot D}{4 \cdot \lambda \cdot \mu} (1 - e^{-z/b})$$

ここに,  $b = \frac{D}{2} \cdot \frac{j_\phi}{\sin 2\phi_0}$ , (充填時)

$\frac{D}{2} \cdot \frac{i_\phi}{\sin 2\phi_0}$ , (排出時)

$$\frac{i_\phi}{j_\phi} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1 - \sin \phi_i \cdot \sqrt{1 - m^2}}{1 + \sin \phi_i \cdot \sqrt{1 - m^2}}$$

$$m = \frac{\tan \phi_o}{\tan \phi_i}$$

$$\lambda = \tan \phi_i$$

$\phi_o$  = 壁面摩擦角

$\phi_i$  = 内容物の内部摩擦角

本式では粉体の充填時の状態を主働圧状態とし、排出時の状態を受働圧状態とするもので、フランスにおけるコンクリートサイロの設計指針に用いられている基本式である。基本物質の物性は表 4.2.1 ~ 表 4.2.2 に示す。

表 4.2.1 基本物質の物性

物 質	$r$ (t/m <sup>3</sup> )	$\phi_i$ (°)
セメント	1.5	28
セメントクリンカー	1.5 ~ 1.6	33
とうもろこし	0.8	24
小 麦	0.85	26
砂 糖	0.92	30
石 こう	1.25	25
小 麦 粉	0.9	20

表 4.2.2 壁面摩擦角  $\delta$  を求める値  $\rho$

種 類	例	$\rho$		
		A	B	C
粉 体	セメント, 石こう, 小麦粉	0.87	0.8	—
小粒体	小麦, とうもろこし 砂糖	0.87	0.75	0.5
大粒体	セメントクリンカー	0.87	0.70	—

ここで 
$$\rho = \frac{\tan \delta}{\tan \phi_i}$$

A : 水平な溝を持ったコンクリート

B : 打ち放しコンクリート面

C : ペンキ塗装のコンクリート

#### (d) Jenike の理論

Jenike は円形サイロにおいて粉体の挙動を解析しているが、サイロ内の荷重状態には次の3つの状態を考えるものとする。

- (1) 初期荷重……………投入時および静止時。
- (2) 流動荷重……………流路, 流形が形成される時。
- (3) スイッチ荷重……………初期状態から流動状態に転換するとき。

これらの荷重状態を図 4.2.4 で説明している。すなわち, 図 4.2.4 の(a)では, 粉体が投入され, 堆積した粉体は水平方向の変位なしに堆積する粉体重量により垂直方向に圧縮される。したがって, 最大主応力線が垂直方向に閉じた主働圧力状態にある。そのときの壁面への粉体圧の分布状態は右側に示すものとなる。図 4.2.4 (b)では, 粉体が排出されると, 排出口上部から順次サイロ上方へ粉体の流動がおこる。完全に流路が形成されると, 最大主応力線はアーチ状になる。図 4.

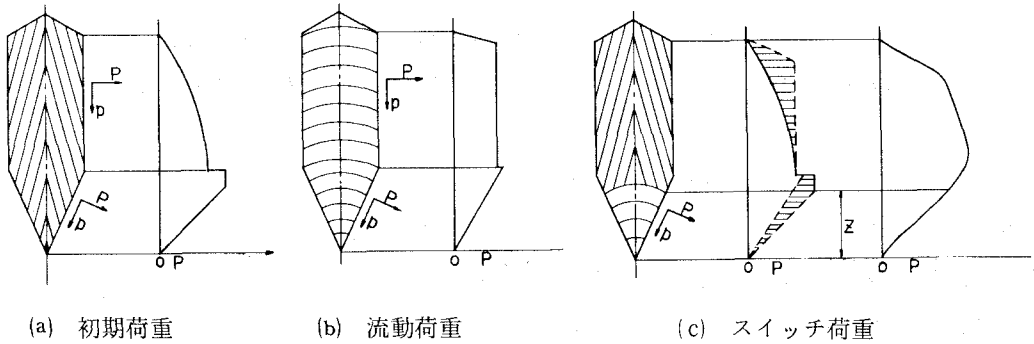


図 4.2.4 Jenike の荷重状態

2.4(c)では、サイロ内で完全に流路が形成され、粉体のフローパターンが定常状態となるまで、粉体圧が主動から受働圧力状態に転換するが、その転換位置で大きな過圧力が生ずる。これをスイッチ荷重と称し、その過圧力の大きさは右側横線を引いた面積となる。

また、Jenikeによれば、円形サイロに適用させる設計荷重を、マスフローおよびファヌルフローに対してそれぞれ与えている。

マスフローの場合、粉体の排出開始後、順次、主動から受働圧力状態に転換していくが、このときに生ずる過圧力のサイロ高さ方向の軌跡を歪エネルギー理論を用いて求める。ファヌルフローの場合、比較的浅いサイロでは Janssen 式による圧力を採用し、深いサイロについては過圧力係数をサイロ高さ方向に求めて、これを Janssen 式による値に乗ずることによって設計荷重としている。

(e) DIN-1055 (西独サイロ設計基準)

DIN-1055は、角柱または円柱型容器に対して与えた設計基準である。粉体圧の基本式は Janssen 式であって、側圧係数や壁面摩擦係数には、内容物の粒径や投入および排出時で区別し

表 4.2.3  $\lambda$  および  $\mu$  の値

	$d > 0.2 \text{ mm}$	$d < 0.06 \text{ mm}$
$\lambda_f$	0.5	0.5
$\lambda_e$	1.0	1.0
$\mu_f$	$\tan 0.75 \phi_f$	$\tan \phi_f$
$\mu_e$	$\tan 0.60 \phi_f$	$\tan \phi_f$

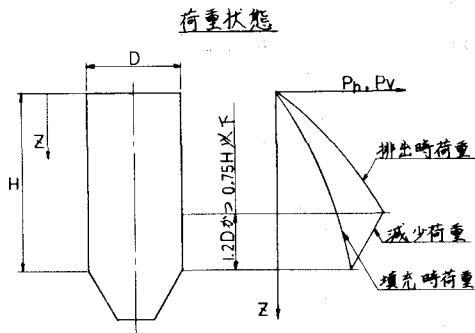


図 4.2.5

(注) 1. サフィックス f および e はそれぞれ填充および排出時を示す。

2.  $d$  は粒径の平均値

3.  $\phi_f$  は内容物の内部摩擦角

た値を使用している（表 4.2.3）。

また、一般的な荷重状態を図 4.2.5 に示す。サイロ下部において排出時荷重を減少させている。Pieper らは壁面の粗さなどを加味しながら、種々の内容物について荷重状態の検証実験を行っている。

(f) TY-124-56 (ソ連邦サイロ基準)

本基準はバラ物質用サイロのものであり、粉体圧はやはり Janssen 式を基本とし、経験により修正を加えている。投入および排出時の動圧力に対して動圧係数  $n_a$  を Janssen 式に乗ずるものとする。n は過負荷係数 1.3,  $a$  を修正係数としてサイロの高さ方向に区分して与えている（図 4.2.6）。

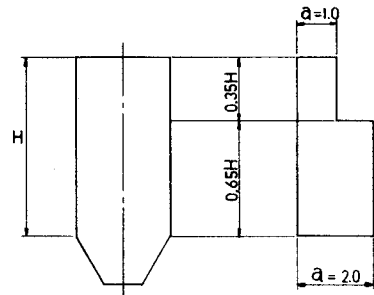


図 4.2.6

(g) ACI-313 (米国コンクリートサイロ基準)

粉体の基本式には Janssen および Reimbert 式を用い、投入時および排出時荷重に対して、それぞれ衝撃係数  $C_i$  および過圧力係数  $C_d$  を与えている。

米国では小麦用サイロで多くの破壊事故を経験し、種々の検討を行って基準の見直しを行ってきた。

また、Safarianらによって鋼製サイロに対しても上記係数  $C_i$  および  $C_d$  が与えられている。

(h) 日本建築学会容器構造分科会(案)

粉体圧の基本式はやはり Janssen 式であり、サイロ水平方向荷重に対して動圧係数  $C_d$  を考慮する。 $C_d$  の値はサイロの深さ方向およびホッパー部で異なった値をとるものとする（図 4.2.7）。

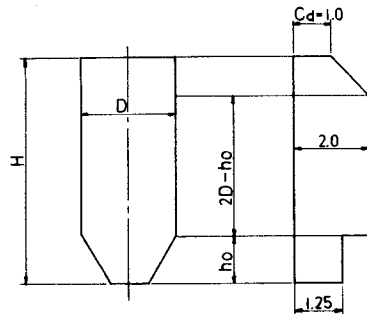


図 4.2.7

(i) 日本建築学会荷重基準(案)

Janssen 式を基準にして、動圧力に対してサイロ高さ方向に区分して与えられた過負荷係数  $n$ , 修正係数  $a$  を

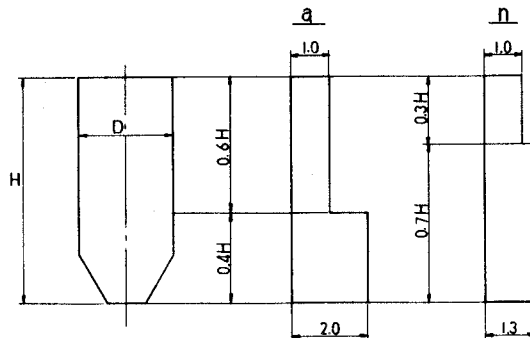


図 4.2.8

乗ずるものとする (図 4.2.8)。

(j) Deutsch による設計線図

Deutschらはサイロ内のフローパターンを図 4.2.9 のように定義し、実験値より整理した設計曲線を提案している (図 4.2.10)。

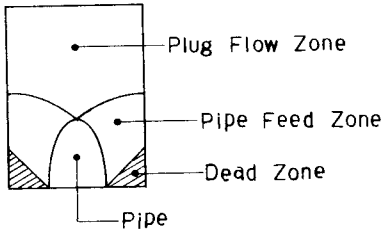


図 4.2.9

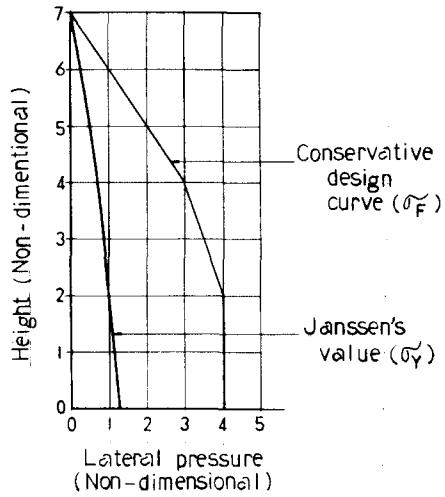


図 4.2.10 ドイツの設計線図

4.2.3 粉体圧の比較

前項で述べた各国の基準ならびに理論式を用いて、深い円形サイロの水平方向の粉体圧を比較してみると、図 4.2.11 のようになる。内容物を小麦とし、計算に用いた諸元を表 4.2.4 に示す。また、計算値を表 4.2.5 に記す。

図 4.2.11 により判るように、同じ寸法形状のサイロに同一内容物を入れた場合でも粉体圧がかなり異なっている。サイロ構造の設計にあたって、粉体の動的圧力状態を考慮するので、静的圧力状態 (たとえば、Janssen 理論値) の 2~3 倍の値が設計粉体圧として考えられるようである。

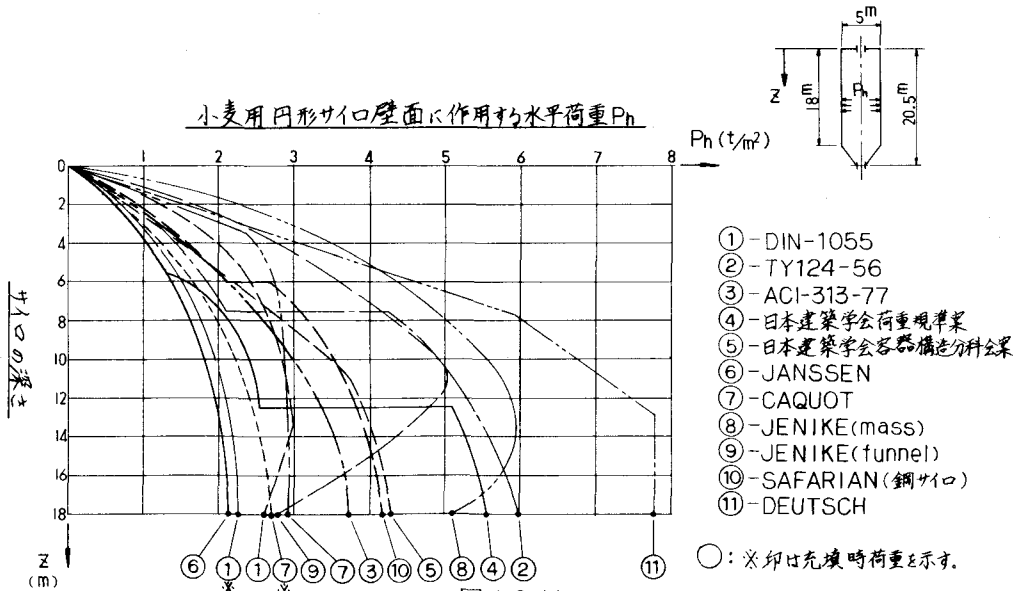


図 4.2.11

表 4. 2. 4 粉体圧の計算に用いる小麦の物性

No.	理論式・基準	記号	物性値	
			投入時	排出時
①	D I N - 1055	$r$ (t/m <sup>3</sup> ) $\phi$ (°) $\mu$ $\lambda$	0.8 3.0 0.414 0.5	0.8 30 0.325 1.0
⑦	CAQUOT	$r$ (t/m <sup>3</sup> ) $\phi_i$ (°) $\phi_o$ $m$ $i_\phi$ $j_\phi$	0.85 26 20 0.746 - 1.824	0.85 26 20 0.746 0.584 -
③ ④ ⑤ ⑥ ⑩ ⑪	A C I - 313 - 77 日本建築学会荷重規準(案) 日本建築学会容器構造分科会(案) J A N S S E N S A F A R I A N (鋼製サイロ) D E U T S C H	$r$ (t/m <sup>3</sup> ) $\phi$ (°) $\mu$ $\lambda$	0.8 30 0.44 0.45	
②	T Y - 124 - 56	$r$ (t/m <sup>3</sup> ) $\phi$ (°) $\mu$ $\lambda$	0.8 - 0.4 0.44	
⑧ ⑨	J E N I K E (Mass flow) " (Funnel flow)	$r$ (t/m <sup>3</sup> ) $\phi$ (°) $\mu$ $\lambda$ $\nu$	0.8 30 0.44 0.45 ポアソン比	0.4 (仮定)

表 4.2.5 (1) 小麦用円形サイロ・水平方向荷重計算値

(t / m<sup>2</sup>)

規準 理論 Z (m)	① DIN-1055		② TY-124	③ ACI-313	④ 日本建築学会荷重規準(案)	⑤ 日本建築学会容器構造分科会(案)	⑥ JANSSEN
	充填時	排出時					
3.5	1.062	1.838	1.264	1.418	0.967	1.289	0.967
5.5	1.443	2.340	1.751	2.007	1.321	2.014	1.321
6.5	1.591	2.509	1.948	2.259	1.899	2.365	1.461
7.5	1.717	2.639	4.239	2.482	2.053	2.708	1.579
8.5	1.823	2.739	4.535	2.688	2.185	3.042	1.681
10.5	1.990	2.876	5.017	3.039	2.394	3.683	1.841
11.5	2.055	2.922	5.212	3.197	2.476	3.810	1.905
12.5	2.109	2.958	5.381	3.336	5.093	3.917	1.958
13.5	2.156	2.985	5.528	3.469	5.212	4.009	2.004
14.5	2.195	3.006	5.656	3.577	5.314	4.088	2.044
15.5	2.229	2.894	5.766	3.635	5.401	4.155	2.077
16.5	2.257	2.782	5.863	3.686	5.476	4.212	2.106
17.5	2.281	2.671	5.946	3.728	5.539	4.261	2.130
18.0	2.291	2.615	5.984	3.747	5.567	4.282	2.141

表 4.2.5 (2) 小麦用円形サイロ・水平方向荷重計算値

(t / m<sup>2</sup>)

規準 理論 Z (m)	⑦ CAQUOT		JENIKE		⑩ SAFARIAN	⑪ DEUTSCH
	充填時	排出時	⑧ MASS FLOW	⑨ FUNNEL FLOW		
3.5	1.136	2.553	3.223	2.000	1.451	2.686
5.5	1.574	2.697	4.154	3.385	1.982	4.220
6.5	1.751	2.780	4.548	3.796	2.849	4.988
7.5	1.904	2.832	4.896	4.116	3.079	5.754
8.5	2.038	2.865	5.197	4.470	3.278	6.219
10.5	2.254	2.897	5.656	5.028	3.590	6.948
11.5	2.342	2.905	5.809	5.027	3.715	7.367
12.5	2.417	2.910	5.905	4.78	3.818	7.750
13.5	2.483	2.913	5.940	4.50	3.908	7.888
14.5	2.541	2.915	5.906	4.21	3.986	''
15.5	2.591	2.917	5.794	3.794	4.050	''
16.5	2.633	2.917	5.596	3.383	4.107	''
17.5	2.671	2.918	5.301	2.971	4.153	''
18.0	2.688	2.919	5.116	2.765	4.175	''



## 参 考 文 献

- 1) A.W. Jenike and J.R. Johanson, "Bin Loads" proc. ASCE, Jour. Structural Div., ST4, April 1968.
- 2) A.W. Jenike and J.K. Johanson, "On the Theory of Bin Loads" Trans. ASME, Jour. Engrg. for Ind., May 1969.
- 3) A.W. Jenike, J.R. Johanson and J.W. Carson, "Bin Loads - Part 2; Concepts", Trans. ASME, Jour, Engrg. for Ind., Feb. 1973.
- 4) A.W. Jenike, J.R. Johanson and J.W. Carson, "Bin Loads - Part 3; Mass-Flow Bins", Trans. ASME, Jour. Engrg. for Ind., Feb. 1973.
- 5) A.W. Jenike, J.R. Johanson and J.W. Carson, "Bin Loads - Part 4; Funnel-Flow Bins", Trans. ASME, Jour. Engrg. for Ind., Feb. 1973.
- 6) K.Pieper, "Investigation of Silo Loads in Measuring Model", Jour. Engrg. for Ind., May 1969.
- 7) O.F. Theimet, "Failures of Reinforced Concrete Grain Silos", Trans. ASME, May 1969.
- 8) German Gurfinkel, "Reinforced-Concrete Bunkers and Silos".
- 9) G.P. Deutsch and L.C. Schmidt, "Pressure on Silo Wall", Trans. ASME, May 1969.
- 10) G.P.Deutsch and D.H.Clyde, "Flow and Pressure on Granular Material in Silo", Jour. Engrg., Mech. Div., Feb. 1967.
- 11) ACI -313 -76.
- 12) DIN - 1055.
- 13) TY - 124 - 56.
- 14) 仏国コンクリートサイロ指針.
- 15) 日本建築学会荷重基準 (案) .
- 16) 日本建築学会容器構造基準 (案) .
- 17) 谷 資信編著, 建築物の構造解析シリーズ「板構造の解析」, 技報堂, 昭和51年8月.