

サイロ壁体に加わる圧力分布の測定

高橋 和 男 武田 明 男*
 山 原 浩 光 安 明**
 内 西 二 郎 (*, **大阪支店設計部)

§ 1. 概 要

鉄筋コンクリート造サイロについては、世界各国でも数多く建設されており、それに伴ってサイロが倒壊したり、破損したりする事故も近年かなり発生している。

最近のノルウェー土木研究所の報告 (IVARJ・JOHANNESEN による) 等にもみられるように、それ等の原因の一つに、サイロ壁体に加わる圧力を低く評価しているのではないかとの疑いが、サイロ建設に関係する工学者の間に抱かれはじめてきつつあるのが現状である。

サイロ内圧力に関する研究は、古くから行われているが、未だに1895年来の JANSSEN の古典的な学説を越えるものはなく、今日のサイロ設計も、もっぱら JANSSEN 式によっている。

サイロの破損事故について、苦々しい経験をもつわれわれも、サイロ理論の再検討に、当面の問題として取り組むことになった。

この度、増田製粉株式会社の好意で、実際の小麦サイロについて実験の機会が与えられたので、この際にサイロ壁体に加わる圧力状態を徹底的に調べてみよう、綿密な計画のもとに実験は行われた。本実験では、抽出時に衝撃性の大きな荷重が加わるのではないかとの予想のもとに、圧力の連続的自動記録を行ったことが、類例のない特徴となっている。

この結果、数々の興味ある事実を発見することができ、今後のサイロ設計に貴重な資料を提供し得るものと信じている。

§ 2. 実験方法

(1) 圧力計の機構

本実験に使用した圧力計は、抵抗線式土圧計（共和無線製）と差動変圧式土圧計（自動制御技術研究所製）を特に本実験のために改造したもので、図-1、図-2に示すような構造である。

両圧力計の性能および仕様は次のようになっている。

a) 抵抗線式圧力計:

定格容量	2kg/cm ² または 1kg/cm ²
出力感度	2500×10 ⁻⁶ ±2%
直線性及びヒステリシス	定格容量に対して±1% 以内
使用温度範囲	10~40°C
温度変化による零点移動	0.5% (1°C に対し)
初期平衡度	±2%以内 (20°Cにて)
ゲージ抵抗	240Ω 4Gauge 法
最大耐水圧	2kg/cm ²
絶縁抵抗	50MΩ 以上
温度補償範囲	15±5°C

b) 差動変圧式圧力計:

測定範囲	1.0, 1.5, 2.0kg/cm ²
測定精度	約0.04kg/cm ²
受圧板変位	測定器1目盛当り0.002mm

(2) 圧力計の特性試験

本実験に使用した26個の圧力計に対する特性試験は、基準分銅式標準圧力計により、繰返し厳重に行った。こ

の試験は本実験の前後2回にわたって行い、この間の圧力計の特性変動はほとんど無視できることを確認した。

図-3は各圧力計の特性試験結果を示したものである。本実験で得られた測定圧力値は、各圧力計について上

記の特性試験結果から求めたものである。

また各圧力計の温度変化による誤差は、0~10°C程度の温度変化では問題にならないことを確認したので、測定結果には温度による補正は特に考慮していない。

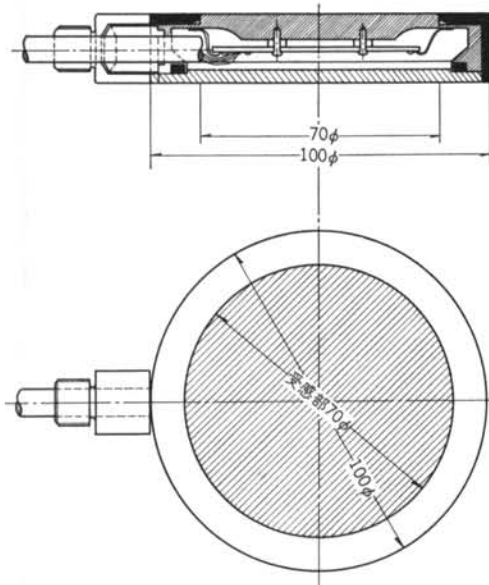


図-1 抵抗線式圧力計の機構図

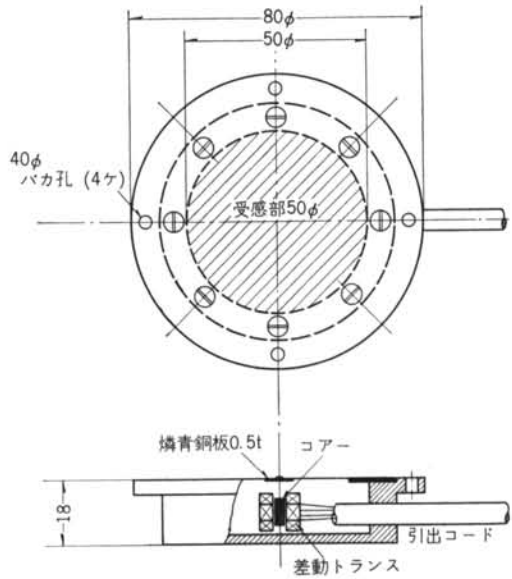


図-2 差動変圧式圧力計の機構図

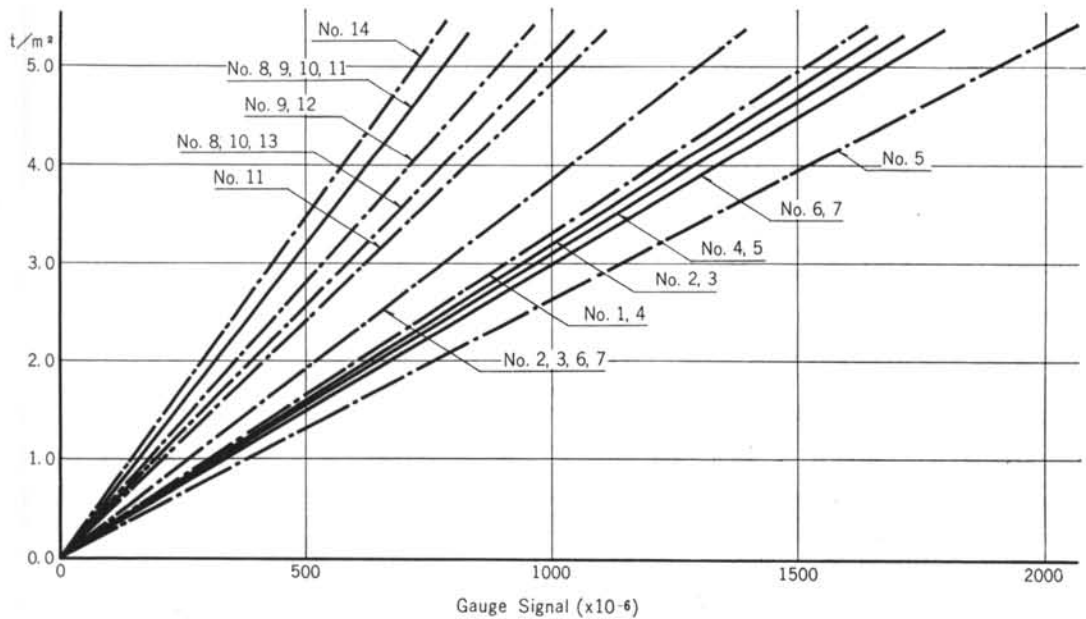


図-3 抵抗線式、および差動変圧式圧力計の特性試験

(3) 圧力計の配置、および取り付け

26個の圧力計は図-4に示すように円筒内壁部に23個、Hopper部に2個、サイロ中心底部に1個配置した。

圧力計の取り付け、およびその詳細は図-5～図-7に示してある。

圧力計を取りつけたライトゲージは、変形が起きた場合でも、圧力計指示には全く影響を与えない。このことは実験的に確かめられている。

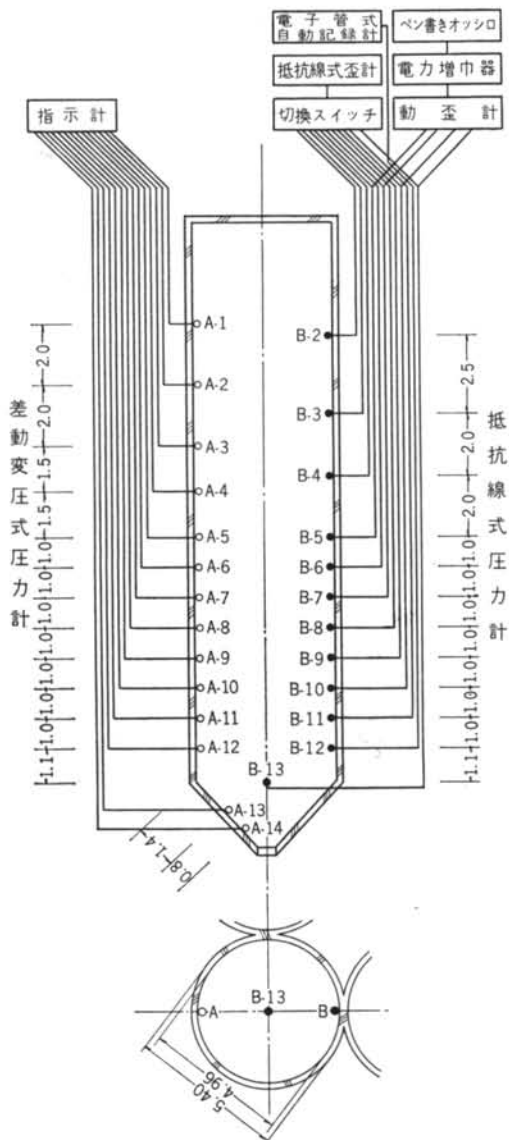


図-4 圧力計の配置、および測定回路図

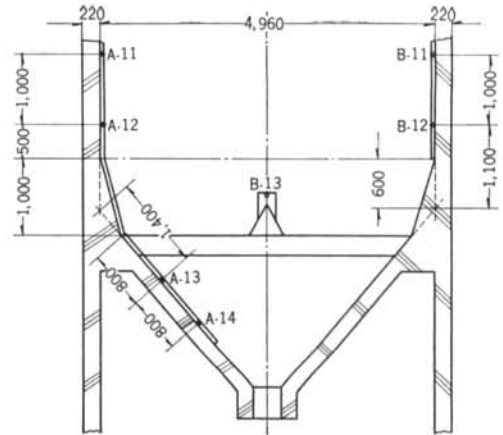


図-5 圧力計配置図 (Hopper部詳細)

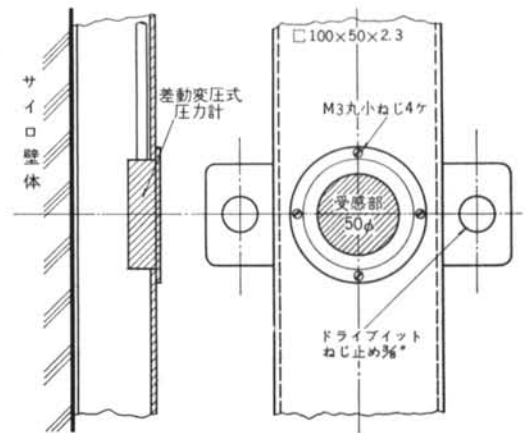


図-6 差動変圧式圧力計の取り付け詳細図

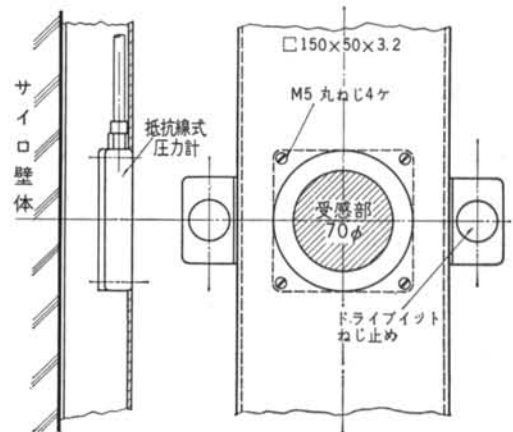


図-7 抵抗線式圧力計の取り付け詳細図 (円筒壁体部)

(4) 測定回路

14個の差動変圧式圧力計は、専用の指示計で所定時間間隔で読取りを行った。12個の抵抗線式圧力計は図-4に示したように、1測点は自動記録計、5測定はペン書きオシログラフに結線して圧力の連続的变化を測定記録し、残りの6測点はストレンメーターにて任意読取りを行った。このうち、ペン書きオシロによる5測点は測定値の絶対精度が低いため、適宜ストレンメーターに結線変えをし、絶対値測定を並行して行っている。

(5) 測定計画

測定は昭和37年9月19, 21日の両日、当初の計画に従って実験1, 実験2と、2度繰返して行われた。いずれの実験も夕刻5時頃から開始され、翌朝8時30分頃までに、投入—満載—抽出の1周期の測定を行った。この際の投入および抽出速度は、平均50t/hを標準とした。これは同サイロの最大能力にほぼ近く、投入—満載—抽出に実働約12時間を要した。各実験における麦の投入、抽出経過は図-8に示してある。

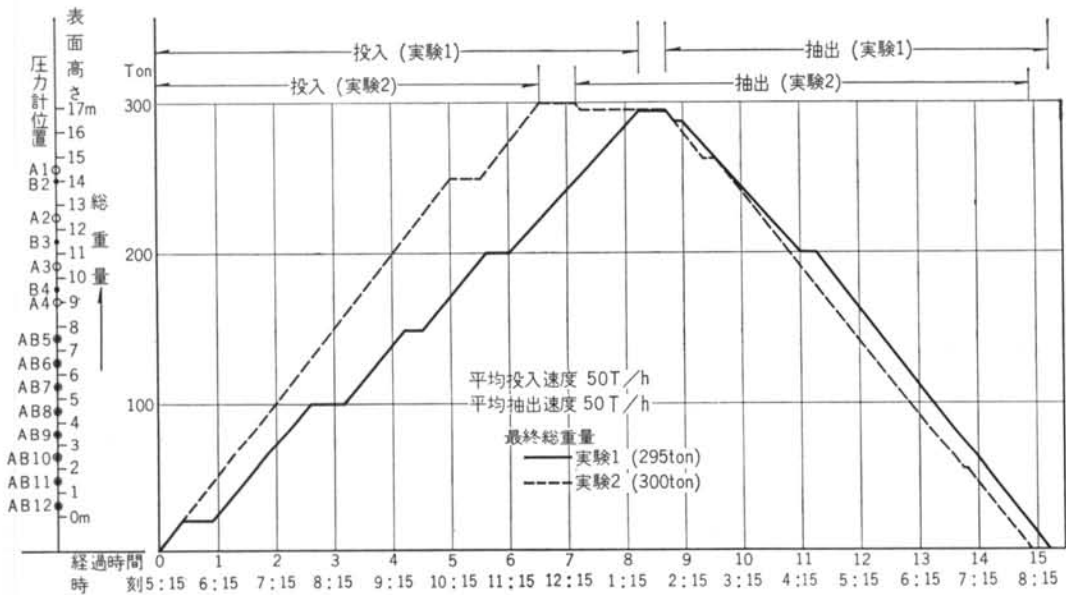


図-8 投入・抽出経過曲線

§ 3. 実験結果

(1) 投入時における圧力分布

麦の投入は図-8に示した投入経過で行った。実験1は満載時麦重量が295tonで、途中の機械故障等のため、投入所要時間8時間15分を要した。実験2は満載時麦重量が300tonで、途中中止することなく連続投入を予定し、中間測定も投入中に速やかに行ったため、投入所要時間は6時間30分であった。

投入時の圧力変化は、巨視的にみれば緩慢なものであり、各測点間の測定時差による誤差は、まったく無視し得ると思われる。

麦の投入時各測点の最終圧力分布、および圧力増加傾向曲線は図-9, 図-10に示す。

(2) 抽出時における圧力分布

麦の抽出は、投入完了後約30分休止して開始し、図-8に示す経過で行われた。

抽出時の圧力は短い時間に著しく変動するために、実験1では各段階における静的測定値の変動も大きく、データとして不満足なものとなった。

実験2では圧力変動現象を正確に追跡するため、圧力変動の著しい抽出直後から約1時間は、頻りに休むことなく静的測定の読取りを行い、実験1で充分得られなかった各点の圧力変動の傾向は、ほぼ正確にとらえることができた。また、抽出速度の圧力変化に及ぼす影響を調べようと計画し、抽出した麦を循環し、再び上から投入して重量の変化による影響を除こうと試みた。しかし重量は不変でも、麦の配列、初期圧力分布状態、その他種々な条件が復元しないため、この目的の実験は不可能で

あることがわかり、約1時間休止後、実験1と同様に抽出を行った。抽出時には数秒の周期で小麦が階段的に流動し、こまかい圧力変動をともなうが、巨視的にみた圧力変動特性を、実験2の結果だけについて図-11、図-12に示した。

(3) 投入・抽出時に観測された諸現象について
a) 投入時の圧力変動について

投入時には、サイロ内の小麦がある時間間隔で移動するため、階段状の圧力変動をともなう。この現象は自動記録計およびペン書きオシロ記録から、明確に観察できる。

図-13は投入時の記録から一部を写しとったものであるが、各測点に生ずるこの圧力変動はほぼ同時に起り、圧力変動の向きには、かなり規則的な関係がある。

一般に上層部(0~約3m)では変動によって圧力が上がる場合が大部分で、頻度も高く、下層部(約3m以深)では変動によって急激に圧力が下がる場合が多い。また、サイロ中心底部(B-13)は投入初期の例外を除き、圧力上昇をともなう。

自動記録計にあらわれた範囲(測点B-12)についてこの現象を詳しく調べてみると、投入初期(0~60ton)においては、圧力変動の向きが正(増加)となり、それ以後は大部分、負(減少)となっている。この現象を生ずる時間間隔も、投入初期においては短く、重量の増加に従って長く延長される。図-14はこの模様を図示したものであり、図-15は圧力変動値の分布、図-16は各重

量段階における圧力変動値を示したものである。

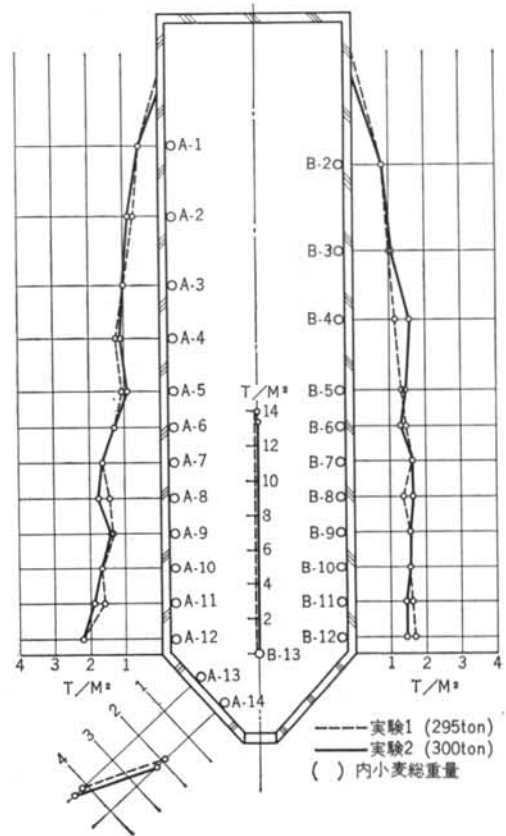


図-9 投入時の最終圧力分布

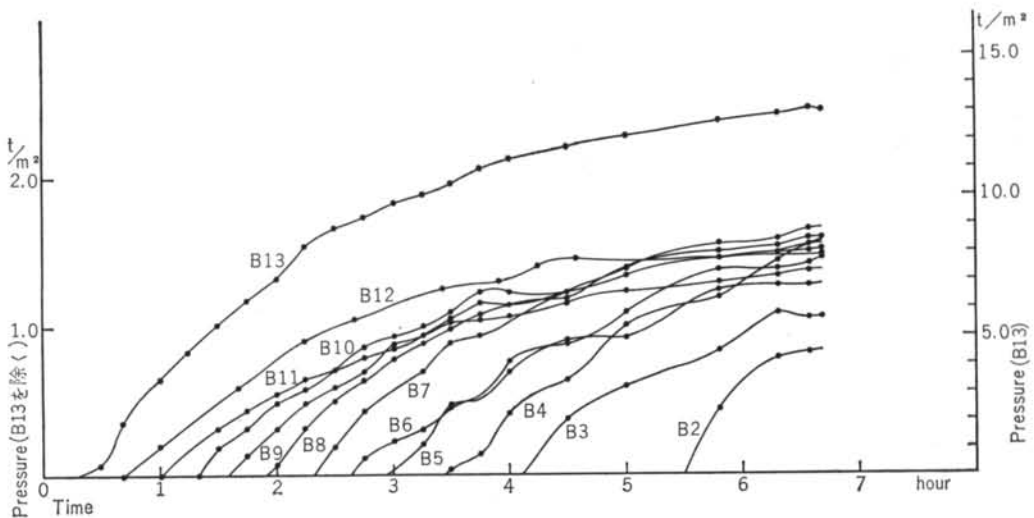
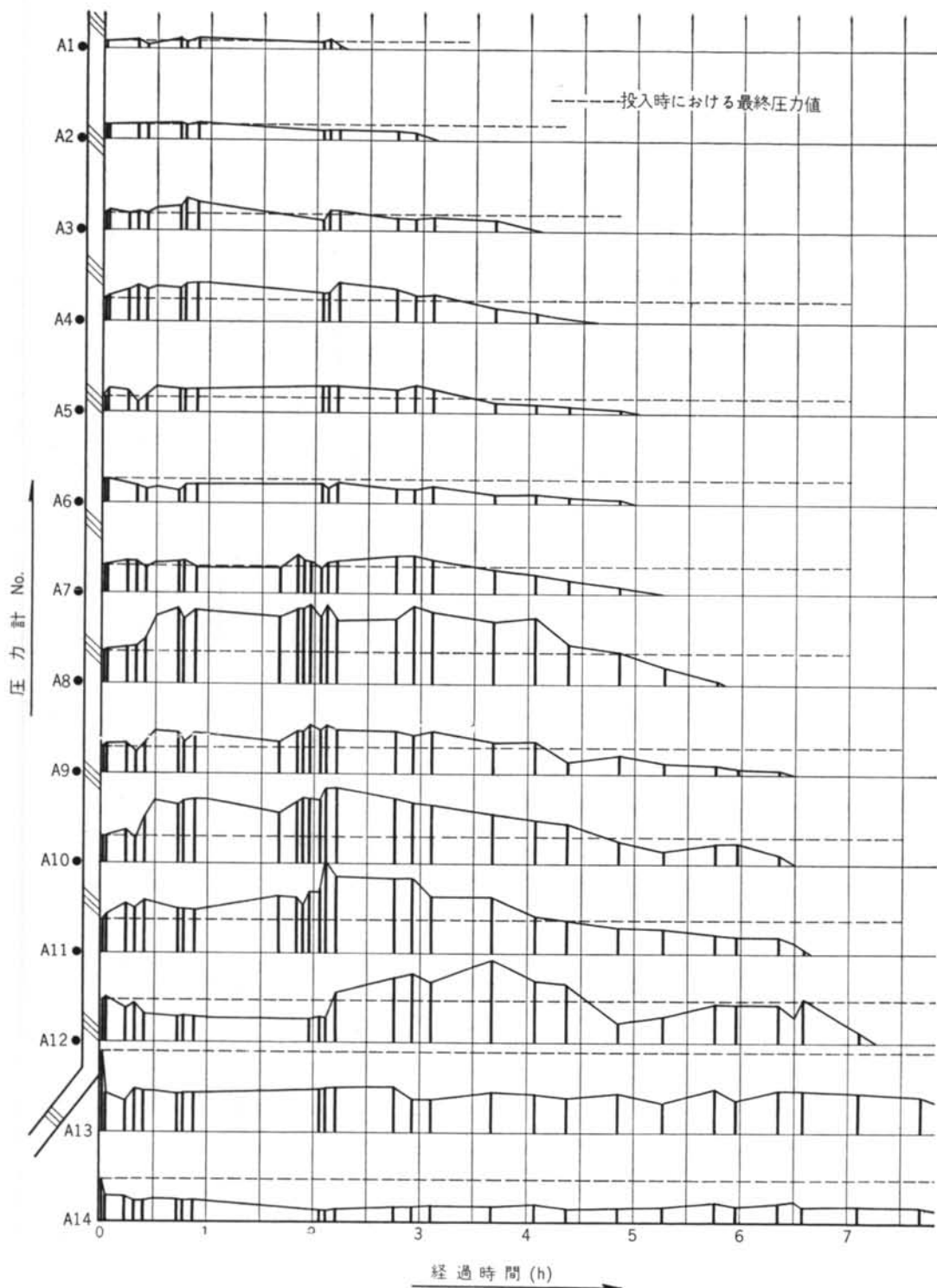
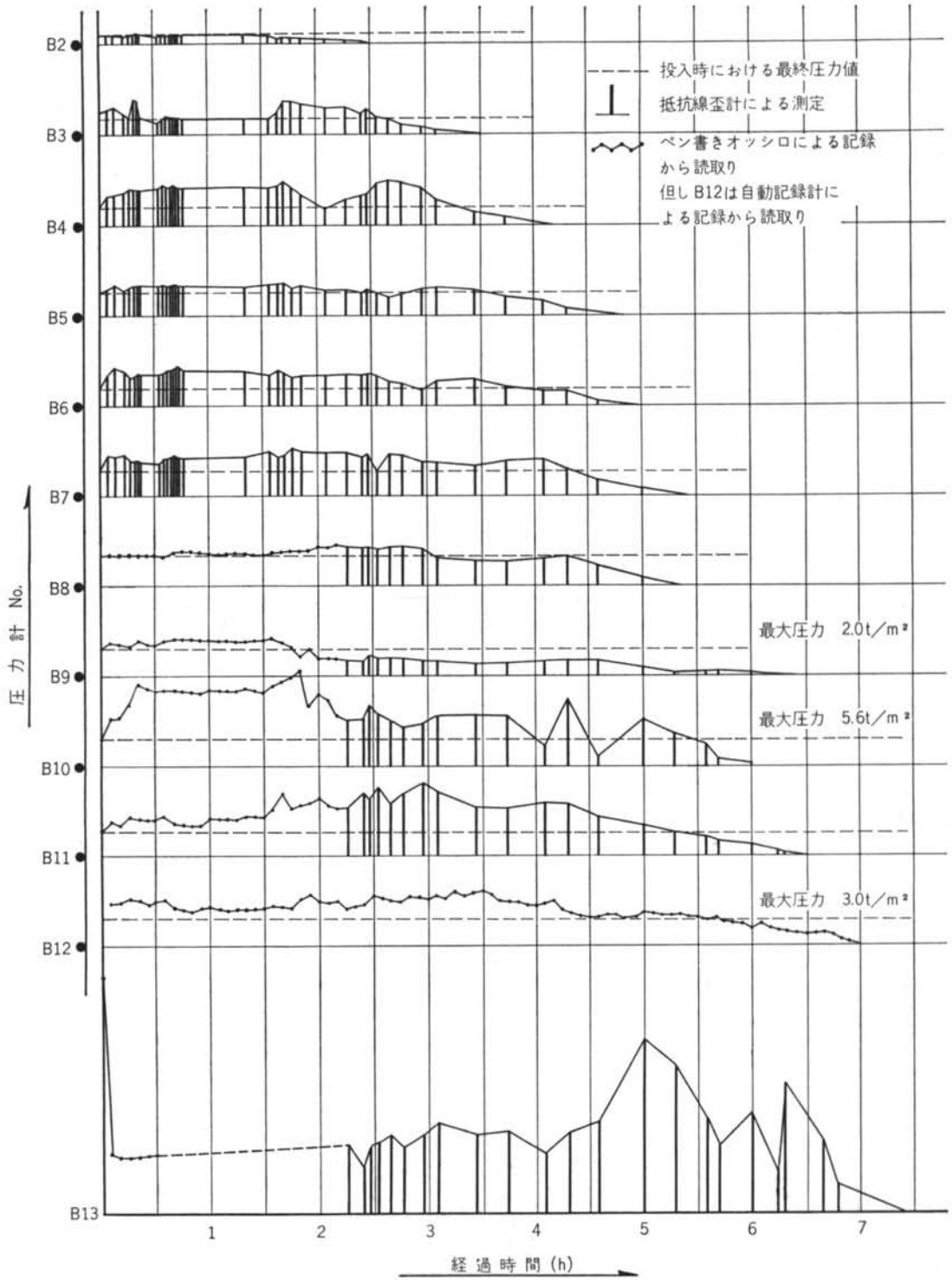


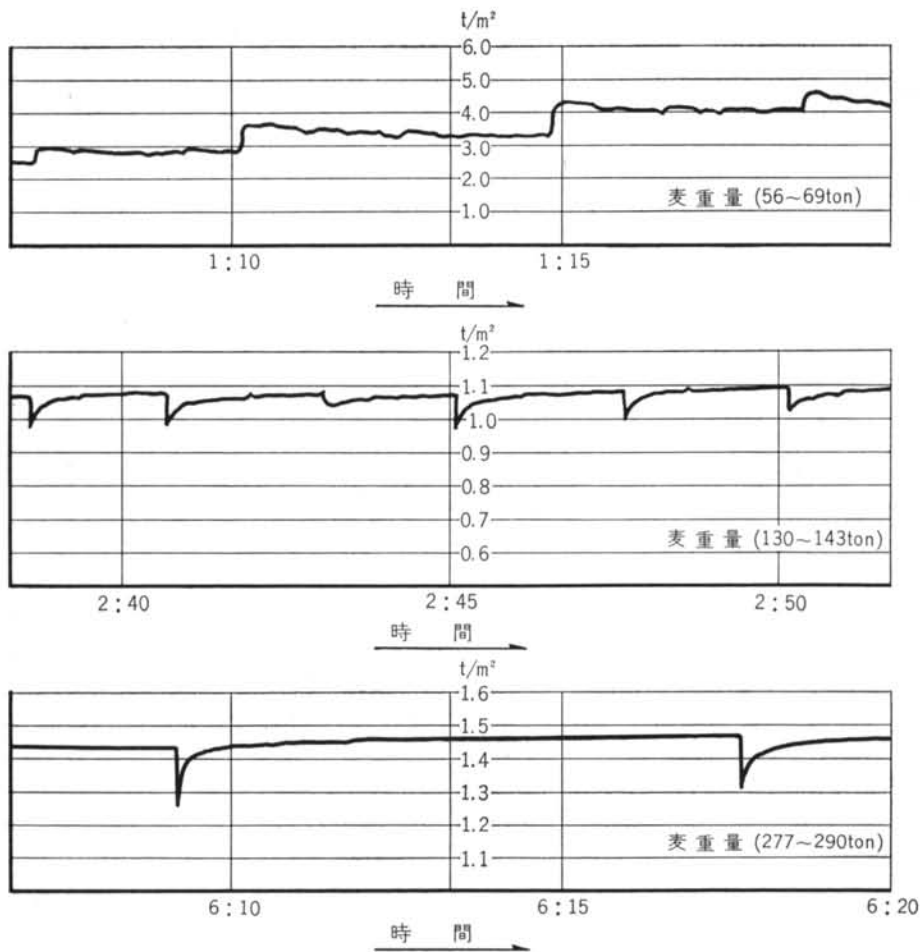
図-10 投入時における各点の圧力増加傾向曲線



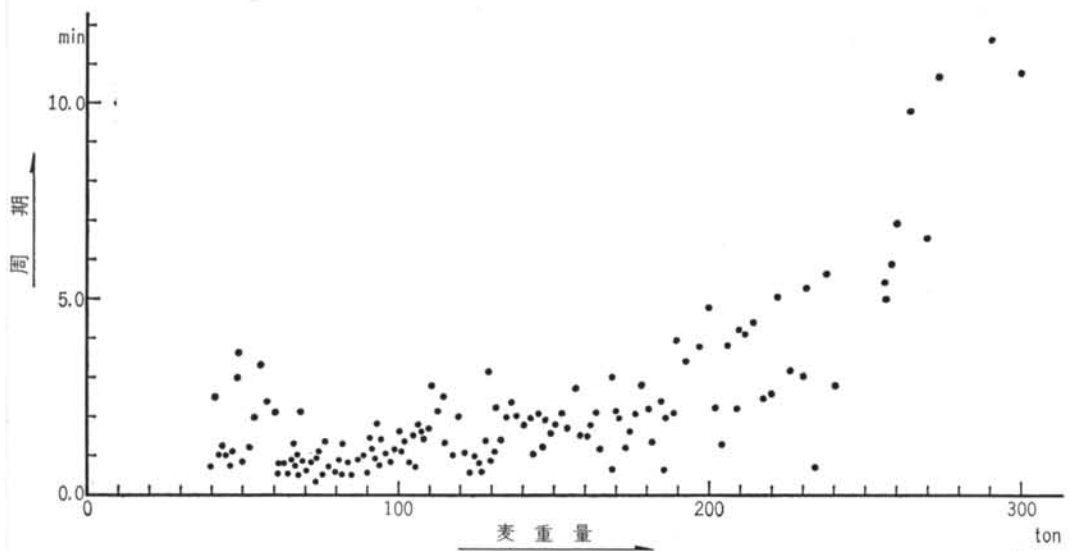
図一11 抽出時における各点の圧力変動特性
 (差動変圧式圧力計による静圧力測定結果より)



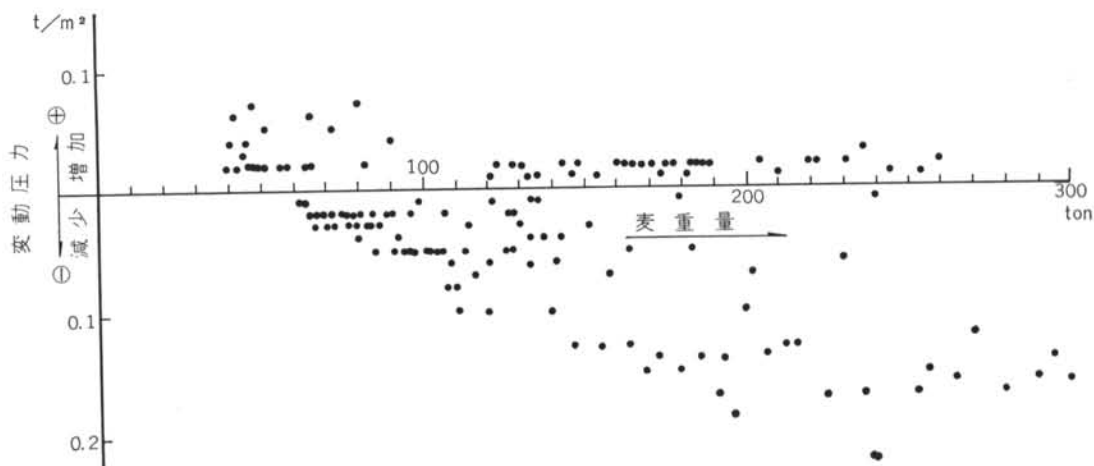
図一12 抽出時における各点の圧力変動特性
 (抵抗線式圧力計による静圧力測定, およびペン書きオッシロ記録より)



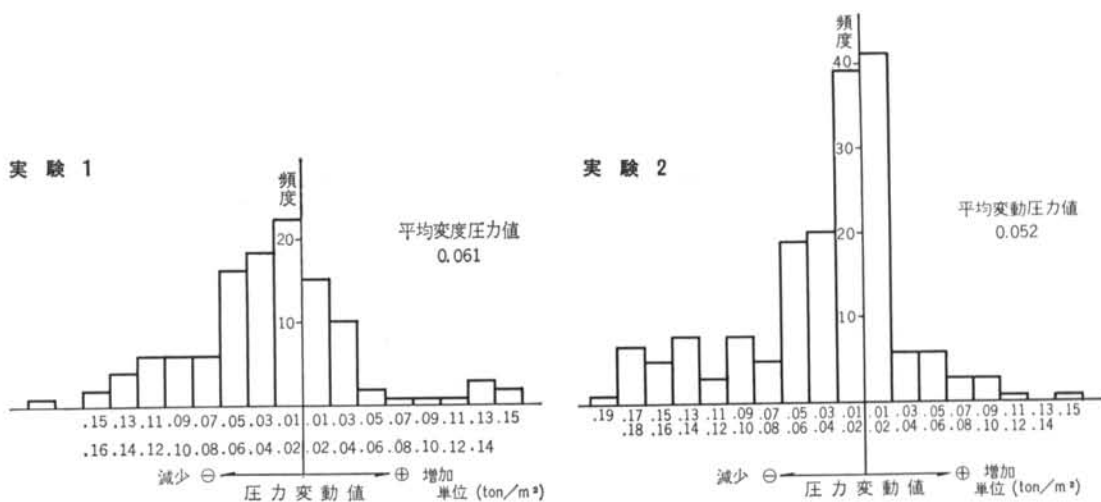
図一13 投入時（初期，中期，末期）における圧力変動現象（測点B-12）



図一14 投入時の各重量段階における圧力変動周期分布図（測点B-12・自動記録計による）—実験2



図一15 投入時の各重量段階における変動圧力値の分布 (測点B-12) —実験2



図一16 投入時における圧力変動値頻度分布

b) 抽出直後の圧力変動について

抽出開始直後の圧力変動は極めて急速で、静圧測定用の抵抗線歪計、または指示計で圧力を追跡するのはほとんど不可能である。

今回の測定では、B-13、B-12、B-11、B-10、B-9、B-8、B-7、B-3の各測点について動的記録を得たが、サイロ底部中央のB-13測点については圧力の変動が予想したより著しく、ペン書きオシログラフからの記録では十分な結果は得られなかった。

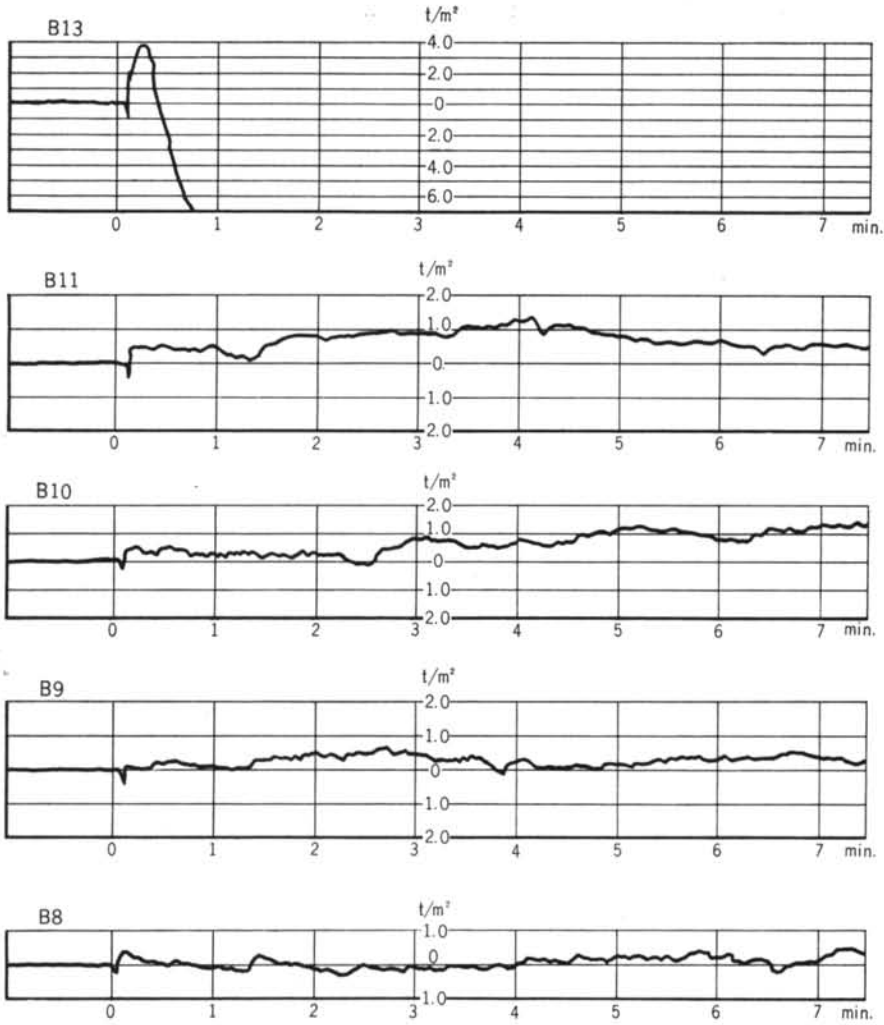
実験1では開始後約2分30秒で抽出を中断し、約12分後に再開したが、再開時の圧力変動は最初に較べて顕著

ではなかった。

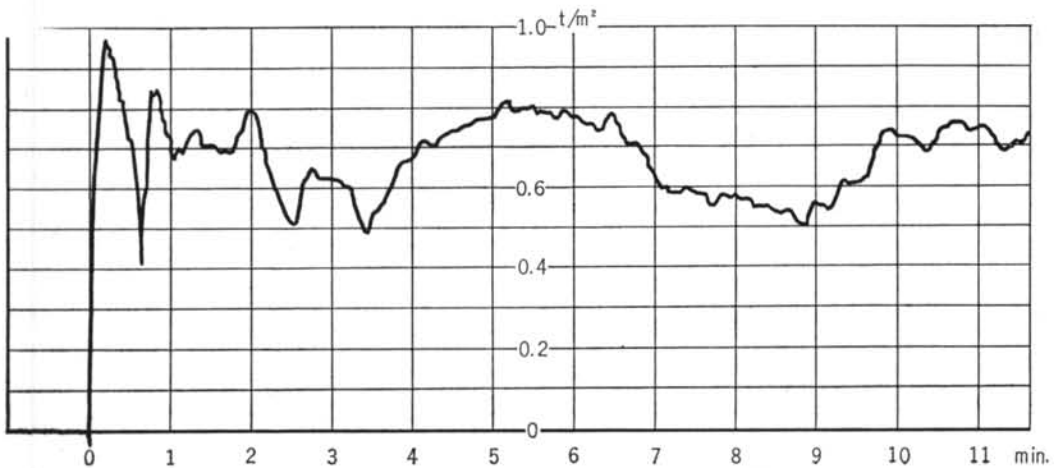
実験2では抽出と同時に投入も行い、小麦重量が一定となるように運転を開始し、約19分後に中断した。

抽出時を通じた圧力変動は、実験1と実験2では相当の差があるが、抽出直後における瞬間的増大圧力はかなり一致している。測点B-13における圧力は一時増加後、急激に減少し、実験1,2ともオーバースケールとなったため、減少圧力の値は不明である。

これらの圧力変動現象の一部を図一17、および図一18に示した。



図一17 抽出直後における圧力変動現象 (ペン書きオシロによる)



図一18 抽出直後における圧力変動現象 (測点B-12・自動記録計による)

c) 各点で測定された最大圧力について

投入時における各点の圧力増加傾向は図-10に示したように、巨視的にみれば滑らかに増加しており、投入時の最大圧力は満載時に生ずる。

抽出時の各点の圧力増減はまったく複雑で、最大圧力値はいずれの点でも投入時の最終圧力値より高く、最大値を示す時期は各点一様ではない。一般的傾向として、側壁部では抽出と同時に圧力は増加し、抽出の経過に従って増加・減少の傾向を交互にたどりながら、全体として減少していく。サイロ中心底部は図-17に示したように

抽出直後に一時増加し、最大値を示し、以後急激に減少の傾向をたどる。各点で計測された最大圧力は図-25に図示した。ただし各点に加わる最大圧力は、刻々に急激な圧力変動をともなう抽出時では、連続的に記録測定しなければ正確に把えることはできない。したがって、ペン書きオシシロ、または自動記録計から読取った最大値は、正確にその点に加わった最大圧力値を意味するが、抵抗線歪計または指示計から読取った値は、必ずしも最大圧力値を意味していない。図-19は自動記録計の記録から最大圧力値附近を複写したものである。

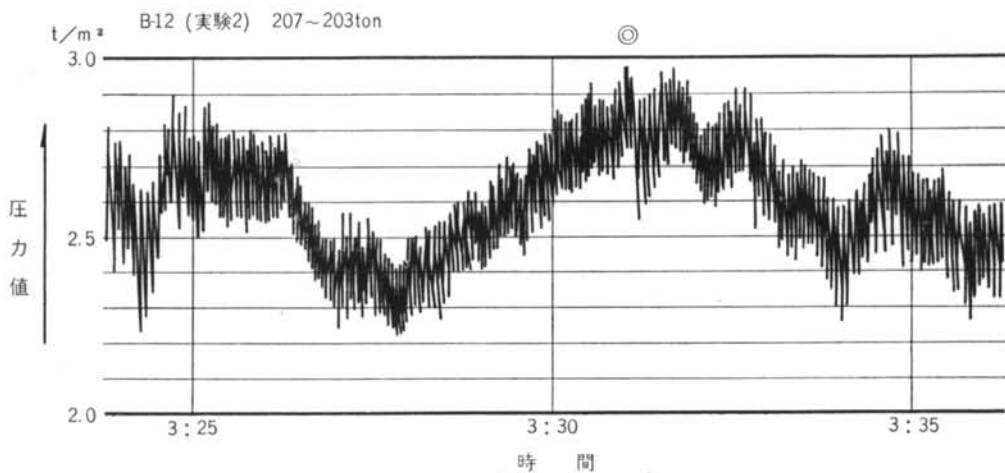


図-19 最大圧力附近 (○印は最大圧力)

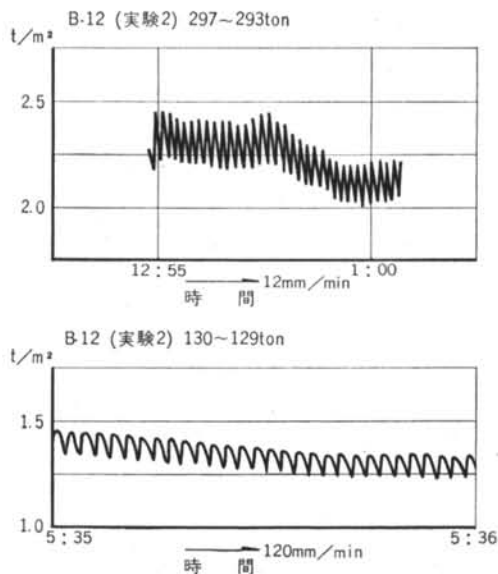


図-20 階段的流動現象による圧力変動 (自動記録計による)

d) 階段的流動現象について

抽出時には底部の麦は連続的に流出しているが、上部に堆積した麦は2~5秒の周期で階段的に流動する現象がある。この現象を階段的流動現象とよぶ。この現象によって、図-20にみるような周期的な振動状波形が記録される。この現象は抽出開始後、実験1で約48分、実験2では約31分後に初めて現われる。以後この階段的流動現象は極めて正確な周期で継続し、麦のサイロ内残り重量が110~120tonになったとき、この現象は急激に消滅してしまった。

当初は流動周期は長く、麦の重量が減少するにつれて流動周期は短くなる。図-21はこの傾向を示したものである。

また抽出時の階段的流動現象による圧力変動の各重量段階における圧力振巾を、測点B-12についてまとめ、図-22に示した。圧力変動の波形を詳しく観察すると、正弦的というよりは、むしろ鋸歯状波に近い。また各点

における波形も、麦の残量によって変化している。
サイロ側壁部と底部では、反対の変動特性を持ってい

る。これらの模様は図-23に実際の記録を複写し、説明を加えておいた。

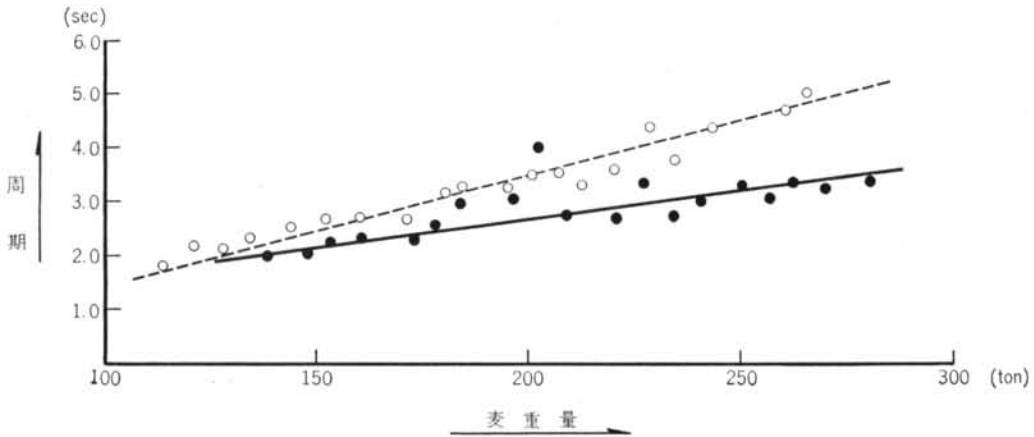


図-21 抽出時の階段的流動現象による圧力変動の各重量段階における周期 (測点B-12・自動記録計による)

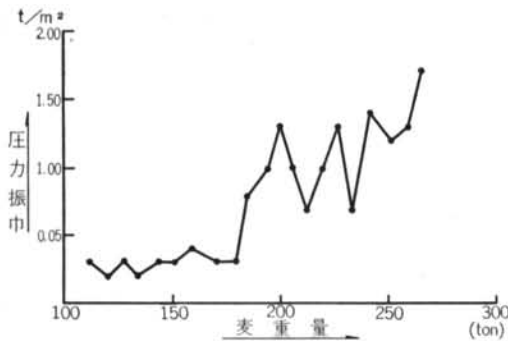


図-22 抽出時の階段的流動現象による圧力変動の各重量段階における圧力振巾 (測点B-12・自動記録計による)

e) 投入・抽出停止後の圧力変動について

投入時の圧力変動については §3-(1)に示した通り、ある時間間隔をおいた階段状の圧力変動があるが、一時投入を中止した期間内においても、この変動は継続される。しかしながら、時間間隔は停止期間中は長くなり、側圧と底圧の変動の向きは §3-(1)の場合と同様、正負反対となる。

抽出時の圧力変動については §3-(2)および §3-(4)に示した通りであるが、抽出停止時にはこれらの変動は消失し、圧力は指数函数的に滑らかに減衰する。

自動記録計にあらわれた範囲(測点B-12)についていえば、圧力の減少は、存在内圧の 18.5%~8.8% (0.38 t/m²~0.17t/m²)となった。自動記録計に記録された圧力減少傾向を図-24に示す。また圧力減少の割合は上層部ほど少く、下層になるにしたがって増大している。

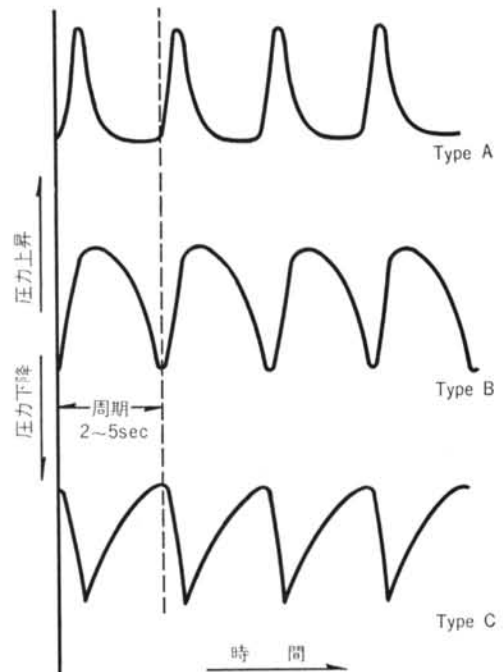


図-23

(注) 階段的流動現象によって、各点に周期的な圧力変動を生ずる。ペン書きオシロ、または自動記録計に現われた各点の波形は Type A, B, C の 3 種に分類される。

Type A ……サイロ底部 (B-13) で終始一貫して波形は変っていない。

Type B ……下層部 (B-12, B-11, ……)

Type C ……上層部 (B-2, B-3, ……)

の典型であるが、この境界は抽出当初B-12~B-10間にあったものが麦の量が減るにつれて下降する。

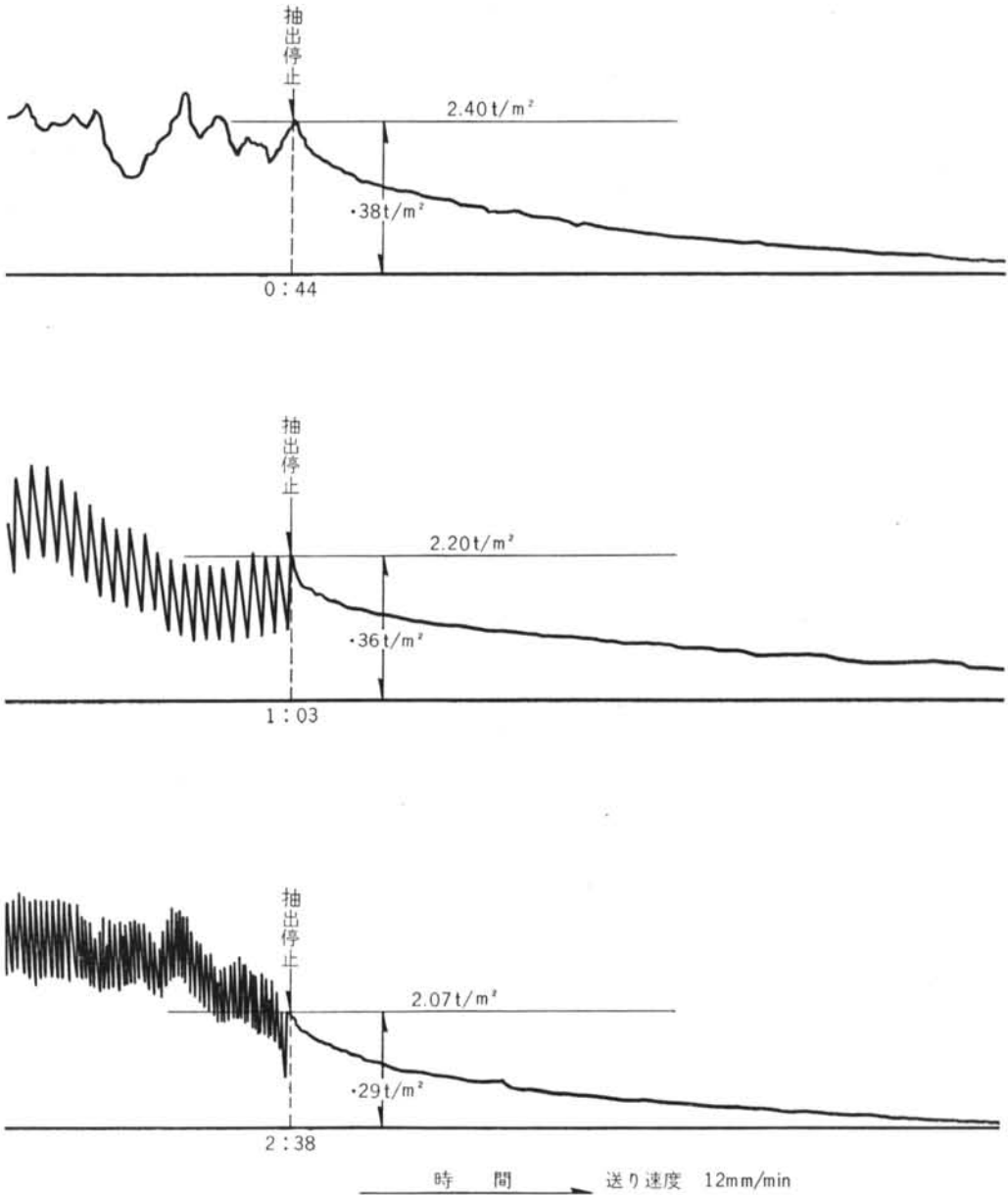


図-24 抽出停止時における圧力減衰現象（自動記録計による）

(4) Janssen の理論計算値との比較

従来、サイロの設計には、次に示す Janssen による式が一般に広く用いられている。

$$P_s = \frac{\gamma}{f} \cdot \frac{F}{U} \left(1 - e^{-\frac{UfK}{F} \cdot Z} \right) \dots\dots(1)$$

$$P_b = \frac{P_s}{K} \dots\dots(2)$$

$$P_h = P_b \cos^2 \alpha + P_s \sin^2 \alpha \dots\dots(3)$$

F : 断面積 U : 周辺の長さ $f = \tan \phi'$: 壁摩擦係数
 P_s : 側圧 P_b : 底圧 P_h : Hopper 部圧力
 α : 水平面と Hopper 部傾斜面とのなす角

今回の実験に使用した麦の単位体積重量は、実際に計測した結果 0.82 t/m^3 であった。壁摩擦係数 f および圧力係数 K の選定は、次のように仮定する。

Janssen は小麦の実験より $K \approx 0.5$ としているが、

Koenon は土圧理論より,

$$K = \tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) \quad \phi: \text{内部摩擦角}$$

と規定している。

各種文献によると, 内部摩擦角 ϕ は $25^\circ \sim 30^\circ$ となっており, 壁摩擦係数 f は 0.33 , または 0.44 として扱われている。

これらの数値で, 表-1 に示す組合せにより数値計算を行うと, 表-2 のようになる。

このようにしてもとめた計算値と, 実験値との比較を図-25 に示した。

	I	II	III	IV	V	VI
γ	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.80
f	0.33	0.33	0.33	0.44	0.44	0.50
ϕ	$K=0.5$	25°	30°	$K=0.5$	33°	$K=0.5$

表-1

$$\phi = \tan^{-1}(45^\circ - \phi/2)$$

従来的小麦実験より $K=0.5$ と仮定

圧力計 No.	投入時 最終平均 圧力 t/m^2	理論計算値 t/m^2						抽出時における 最大圧力 t/m^2		抽出時における 最大圧力 投入時最終平均 圧力	
		$\gamma=0.82 \text{ t/m}^3$				$\gamma=0.80$		実験 1	実験 2	実験 1	実験 2
		$f=0.33$			$f=0.44$		$f=0.50$				
		$K=0.5$	$\phi=25^\circ$	$\phi=30^\circ$	$K=0.5$	$\phi=33^\circ$		$K=0.5$			
A-1	0.58	1.15	0.96	0.82	1.06	0.69	1.00	0.63	0.76	1.09	1.31
B-2	0.78	1.26	1.08	0.92	1.18	0.79	1.13	0.75	0.82	0.96	1.05
A-2	0.83	1.59	1.37	1.20	1.45	1.01	1.35	0.83	1.01	1.00	1.22
B-3	1.00	1.78	1.54	1.36	1.58	1.14	1.48	0.96	1.83	0.96	1.83
A-3	1.00	1.94	1.70	1.50	1.70	1.27	1.60	1.35	1.85	1.35	1.85
B-4	1.36	2.08	1.85	1.63	1.80	1.38	1.68	1.15	2.49	0.91	1.83
A-4	1.21	2.14	1.91	1.69	1.84	1.42	1.71	2.24	2.18	1.85	1.80
A-5	1.17	2.31	2.08	1.86	1.94	1.55	1.80	1.50	1.94	1.28	1.66
B-5	1.30	2.40	2.19	1.97	2.01	1.64	1.86	1.51	2.06	1.16	1.59
A-6	1.63	2.49	2.28	2.06	2.06	1.70	1.89	2.55	2.64	1.56	1.62
B-6	1.56	2.55	2.36	2.15	2.11	1.76	1.92	4.23	4.59	2.71	2.94
A-7	1.46	2.63	2.43	2.23	2.14	1.83	1.94	5.40	2.96	3.70	2.03
B-7	1.61	2.68	2.50	2.29	2.16	1.87	1.96	3.94	5.60	2.45	3.48
A-8	1.62	2.74	2.56	2.35	2.19	1.92	1.99	5.00	5.20	3.09	3.21
B-8	1.87	2.79	2.62	2.42	2.22	1.96	2.00	2.90	4.56	1.55	2.44
A-9	13.55	5.60	6.58	7.35	4.46	6.65	4.04	17.60	16.98	1.30	1.25
B-9	4.23	3.97	3.28	3.52	3.16	3.95	2.02	4.05	4.40	0.96	1.04
A-10	2.13	4.00	3.29	3.56	3.18	3.99	2.03	1.98	2.51	0.93	1.18
B-10											
A-11											
B-11											
A-12											
B-12											
A-13											
B-13											
A-14											
B-14											

表-2 Janssen の理論計算値および実験値との比較表

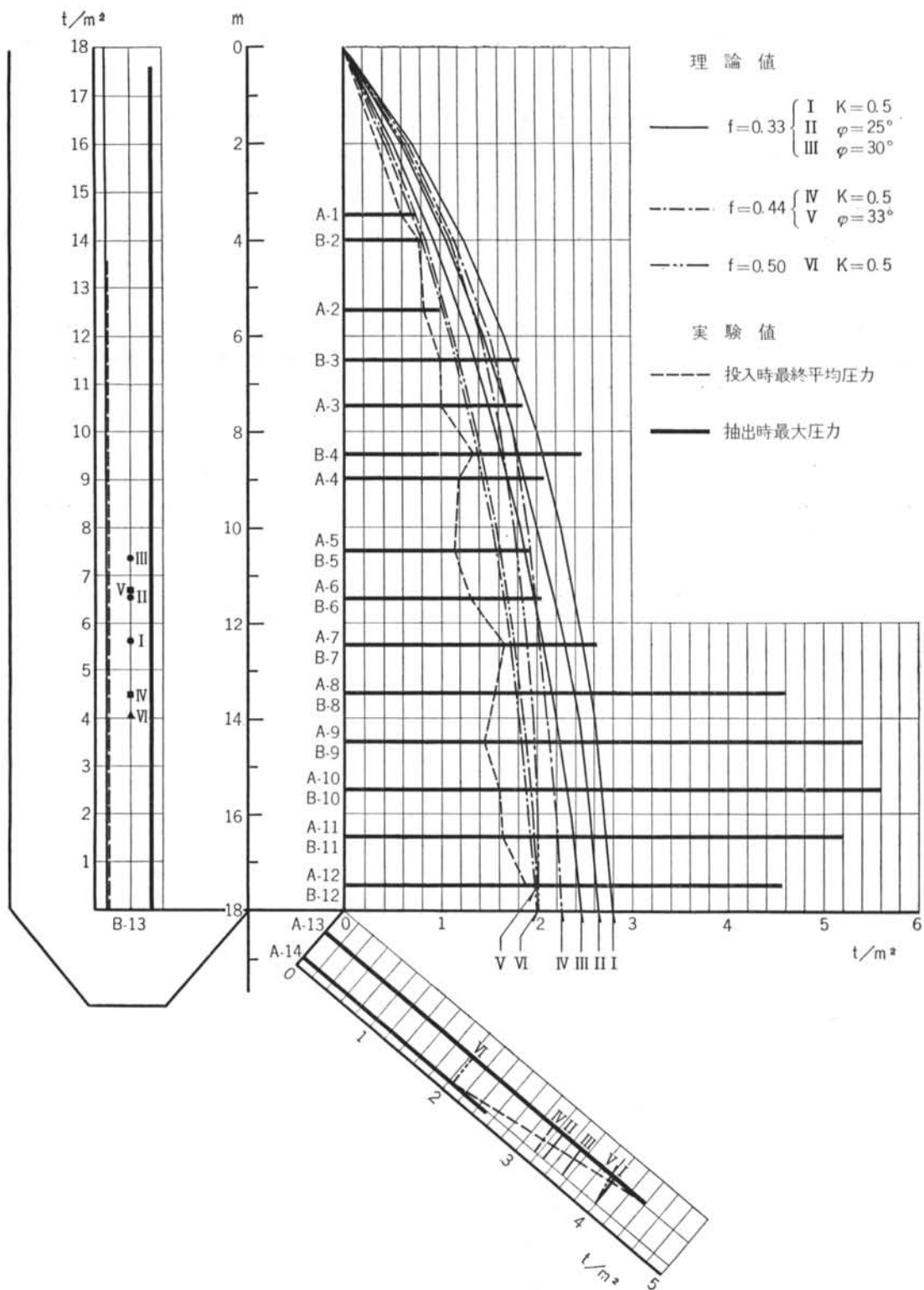


図-25 Janssen の理論計算値と実験値との比較図

投入時における最終平均圧力分布を、包絡線で結んでみると、理論計算値V ($f=0.44$, $\phi=33^\circ$) にほぼ一致する。

同理論計算値が実験値(投入時最終圧力)に対してどのくらいの余裕があるか計算してみると、最大A・B-5(10.5m)において1.33倍、最小A-2(4m)において1.01倍となっている。なお Hopper 部の圧力分布においては、上部のA-13が0.93倍、下部のA-14が1.87倍を示し、また底圧を受ける中央のB-13(18m)においては実験値が(2)式による計算値の2倍以上となっている。

この結果、投入時における側圧分布は、Janssenによる深槽サイロ理論で大過ない説明がつくことがわかる。

抽出時においては、投入時の場合と異なり、非常に不規則な圧力分布をしている。

サイロ上層部6mくらいまでは非常に小さい圧力値を示し、投入時最終平均圧力とほとんど変わらず、サイロ中層部6~13mになると、投入時最終平均圧力値の2倍近くになるところもあり、下層部13~18mになると極度に増大し、A・B-9(14.5m)においては3.7倍となっている。

抽出時最大圧力分布を包絡線で結んでみると、8m附近と15m附近に2つの山を形成し、抽出時においては圧

力分布が(1)式による計算値とは、まったく一致しない。Hopper 部最大圧力分布は、投入時における最終平均圧力とほとんど同じ値となり、特にA-13は(3)式による計算値とも大体一致している。

また中央のB-13は投入時最終平均圧力値の1.3倍、最小理論値IVの約4.4倍、また理論計算値で最も大きいIIIの2.4倍の値を示した。

底圧に受けるB-13に関しては、投入、抽出を問わず(2)式による計算値より実験値が2倍以上になる。

この結果、抽出時における圧力分布は、従来のサイロ理論では十分な説明が得られず、圧力を過少評価していたことが指摘される。

このような抽出時に生ずる様々な現象は、サイロの規模(直径・高さ)、壁面の状態、抽出速度、抽出方法、その他種々の条件によって異なるであろう。

したがって、この実験で得られた結果が一般的なものであるとはいえないかもしれないが、今後各種のサイロについて実験を重ね、比較検討することによって、抽出時における圧力増加の実体が明らかにされるであろう。

一応完成されたと思われていたサイロ理論も、この実験によってむしろ数々の問題点を含み、今後の重要な研究課題として残されていることがわかったわけである。