

穀物サイロにおける内部流動現象

と均一排出装置に就いて

桜井正

(横浜新港倉庫・株)

目次 はしがき

1. サイロ内部の流動現象
2. 均一排出装置に就いて
結び

はしがき

わが国の穀物サイロは、食品工業構造改善事業の一環としての政府によるサイロ増強政策及び、流通革新の一方の担い手としての要請から、昭和40年以來急速に建設が進められ、當時僅かに74万屯に過ぎなかった収容能力は、今や150万屯を超える、昭和45年3月末では180万屯に達する見込である。この中44%を占める64万屯は、営業サイロ或はハンドリングサイロと呼ばれるものである。

この営業サイロは、倉庫業者として第三者の穀物を撒のまま保管し、撒のまま受渡することを主業務とする。従って一般の普通倉庫が個数による受渡を建前とするに反し、重量による数量受渡が原則である。従って常に一BIN単位の引渡が行われるとは限らないので、引渡しの始めから終りまで「均一な状態」の穀物の搬出引渡が期待されることになる。工場サイロの場合でも、製造される製品の品質を均一に保持するために、サイロから搬出し、製造工程に導かれる穀物は、終始均一な状態であることが必要である。

しかるにサイロの場合は、その特異な内部流動現象のために、排出が進むに従って軽いダストや狭雑物が分離浮遊し、最後の段階に近づくと正常な引渡を妨げる程度にまでその混入率が高まるのが普通である。このことはサイ

ロ運営上、甚だ好ましからざる現象であって、サイロ業者の頭痛の種となっている。

よってここでは、この好ましからざる現象の原因を探求し、その解決策の一つとして研究した均一排出装置に就いて報告しようとするものである。

1. サイロ内部の流動現象

サイロ内部における穀粒の流動現象は、極めて複雑微妙で必ずしも明確には把握し難いが、先づ谷口吉郎博士の建築学的研究発表を紹介し、次いで私共が行った模型実験の結果を示すこととする。

イ) 谷口博士の建築学的研究発表（昭和6年5月大会講演）によれば

a. サイロ流動における種々の現象として

- 1) 停滞を生ずる如き流動の不連続性
- 2) 特殊な径路をとる沈下運動
- 3) 表面層に起る転落運動

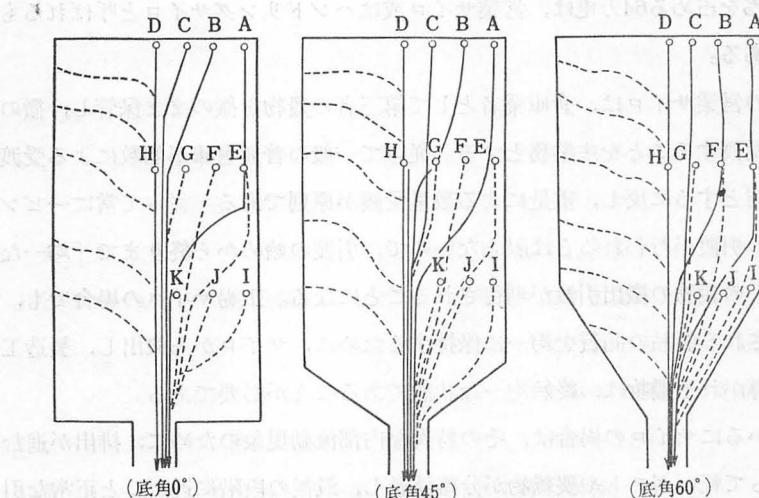


図-1 米穀粒によるサイロ内部の流動

4) これ等によって生ずる不規則な排出順序を挙げられる。

b. 米穀粒によるサイロ内部の流動（図-1 参照）

1) 底角 0° の場合

- ① 排出孔両側の部分は流動を起さず、静止の状態におかれる。
- ② 排出孔に向う方向変換の湾曲度は著しい。
- ③ 中心軸から遠くなる程方向変換の出現は遅くなる。
- ④ 中心軸から遠くなる程速力は小さくなる。
- ⑤ 排出孔の直上範囲に含まれない位置は、堆積層の表面より比較的浅い範囲内に限られている滑動及び転落性の運動によって、中心軸にまで運搬されなければならないため、その位置近くまで堆積層の表面が波及してくる迄、速力の遅い垂直の流下運動を強制されて、方向転換を起し得ない状態におかれる。

2) 底角 45° , 60° の場合

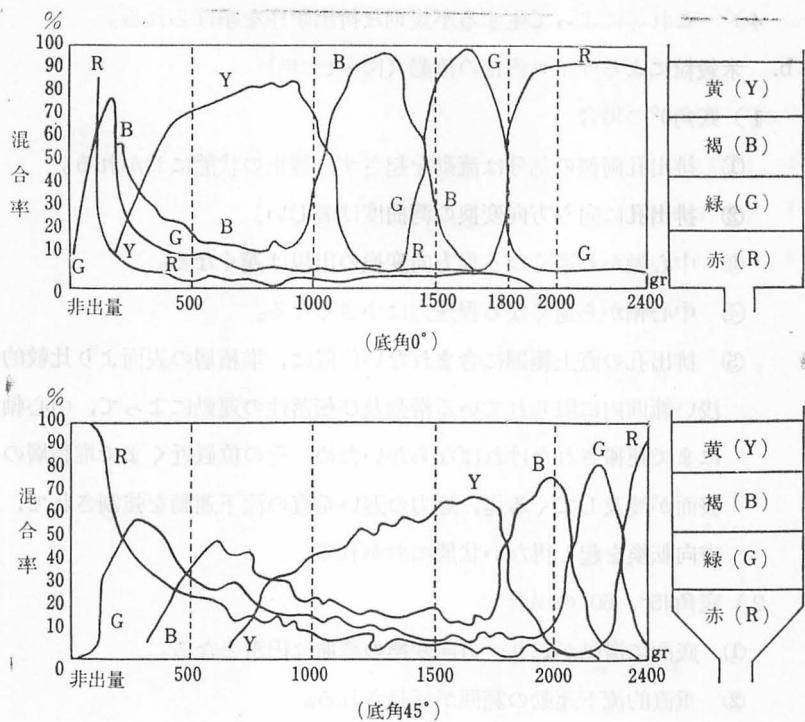
- ① 底面に滑動が起り、方向変換の湾曲は円滑となる。
- ② 垂直的流下運動の範囲が延長される。
- ③ 底角 0° の場合に比較して
各軌道は相並行しようとする傾向が強まり、各位置の速力の差は少くなる。
- ④ 底角の或る程度以上の増大は、流動の均一性を高める。

c. 先入後出傾向を示す排出順序の逆転現象（図-2 参照）

粒状菓子「九重」($56 \text{ g}/\ell$, 息角 44°)を色彩別に下から赤、緑、褐、黄の4層に分けて模型サイロに入れ、底部中心の排出孔から 25g づつ排出して各色別の量を百分比で調べたものである。

1) 底角 0° の場合

最初は下層の「赤」と「緑」が出るが、暫くしてその順序は逆転し、最上層の「黄」が、次に「褐」が、次いで「緑」が出て最後に「赤」が出て、底部に「赤」と「緑」が残留する。



図一 2 サイロの先入後出傾向の排出順序

2) 底角 45° の場合

層の分流は現われるが、排出順序の逆転の出現は著しく遅れて来る。即ち底面の滑動が起り、同時に底角を増大し、底部附近立体積が縮少せしめられたため、下層の「赤」と「緑」の堆積は高さを増し、従って「赤」と「緑」の流出が最初に比較的長く継続する。次いで「褐」、「黄」が出て、「黄」が全部出終る頃になって再び「褐」が、次に「緑」が、最後に「赤」が出て排出が終る。

底角の増大は、先入後出の逆転現象を少なくし、又排出される物質の混合状態の均一性を高める特性を示す。

次に図-3に示すようなアクリル製の模型サイロによって、とうもろこし、マイロ及び大豆の排出時における内部流動を観察した結果は、図-3の通りである。即ち

- ① 排出孔のダンパーを開くと、排出孔直上部分が先づ流出する。
- ② 次に排出孔直上の表層面が次第に凹み始める（中央陥没）。
- ③ 表層面周辺部は、中心軸（排出孔の直上線）の方向に、この凹みに沿って転落を起す。

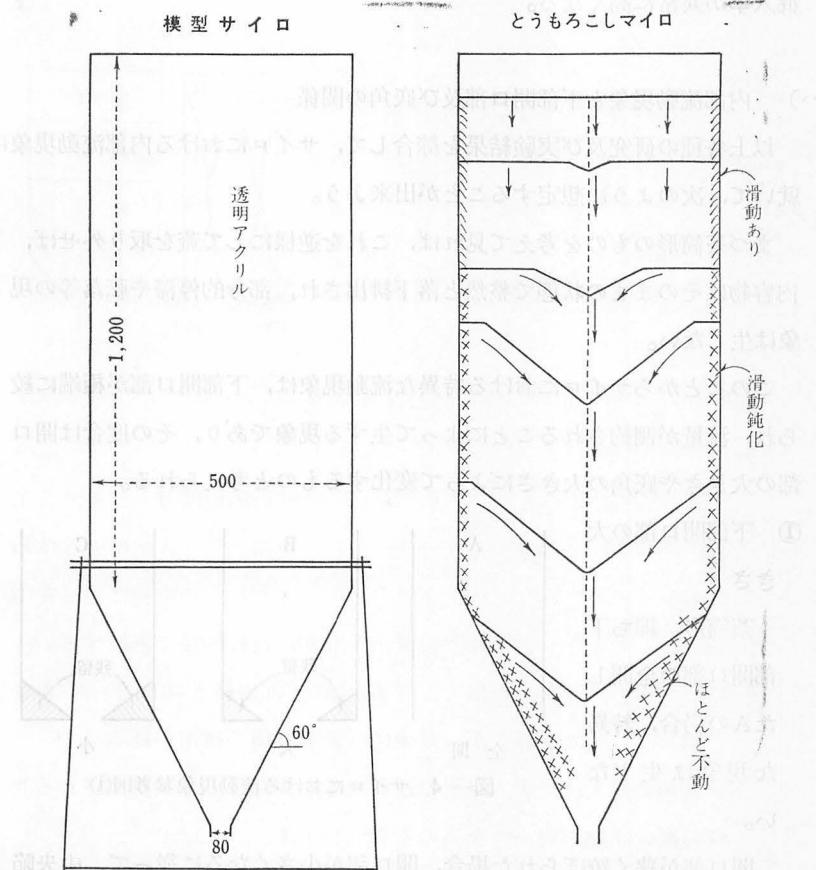


図-3 模型サイロによる内部流動

- ④ 転落に当り、比較的重く、且つ転がり易い穀粒と比較的軽いダスト及び雑物との分離が起り、前者は早く転落しながら中心軸の流れに没入して沈下して行き、後者は表層面に残って浮遊する。
- ⑤ 底面（ホッパー部分）は滑動が極めて鈍く、殆んど不動である。
- ⑥ 垂直壁面部分の滑動も極めて鈍く、直下への流動は殆んど見られない。
- ⑦ 表層面に分離浮遊したダスト及び軽い雑物が、排出の進むに従ってその量を増し、最終段階になって穀粒と共に流出するので、ダスト等の混入率が異常に高くなる。

ハ) 内部流動現象と下部開口部及び底角の関係

以上各種の研究及び実験結果を総合して、サイロにおける内部流動現象に就いて、次のように想定することが出来よう。

まづ茶筒形のものを考えて見れば、これを逆様にして蓋を取り外せば、内容物はそのままの状態で整然と落下排出され、部分的停滞や転落等の現象は生じない。

このことからサイロにおける特異な流動現象は、下部開口部が極端に絞られ、流量が制約されることによって生ずる現象であり、その度合は開口部の大きさや底角の大きさによって変化するものと考えられる。

① 下部開口部の大 きさ

茶筒形、即ち下部開口部の全開したAの場合、特異な現象は生じない。

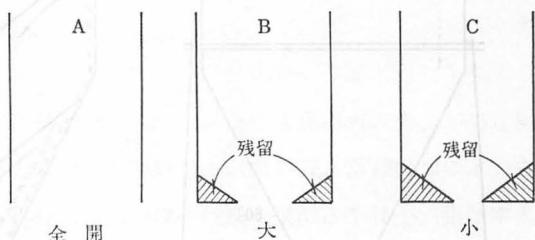


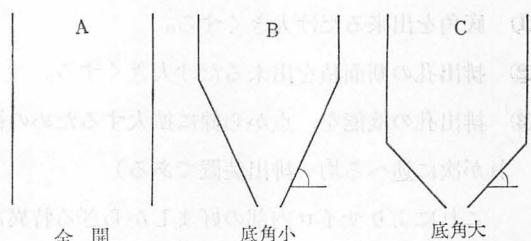
図-4 サイロにおける流動現象参考図①

開口部が狭く絞られた場合、開口部が小さくなるに従って、中央陥没、転落、停滞、残留及び先入後出傾向等の特異な内部流動現象が激し

くなる。

② 底角の大きさ

Aは問題なし。
底角がBからC
へと小さくなるに
従って、①の場合
と同様、特異な現
象が激しくなる。



図一 5 サイロにおける流動現象参考図②

二) サイロ運営上の問題と解決策

サイロに搬入保管される穀類には、程度の差はあるがダスト（粉塵、粉末）、ハスク（葉、茎、皮、さや等）を始め糸屑、木片等が混入しており、搬入の際除塵、集塵装置により或る程度除去するが、時には受渡の都合で一旦除去捕集したダスト類をサイロ内に還元することもあって、相当量のダスト類が穀類と共にサイロ内に混入保管されるのが通例である。

これらのダスト類は、サイロ内部の特異な流動現象の結果、排出に従って分離浮上し、表層面に浮遊して、排出の最終段階に近づくに従ってダスト類の混入率を高め最後には殆んどダスト類ばかりと云える程度に達することもある。

又サイロの下部から排出を行いつつ、上から追加搬入を行う工場サイロの場合には、先入後出現象の結果、上部に相当量のダスト類が浮遊すると共に古いものは何時迄も底の周辺部に残留する傾向となる。同時にダスト類の混入率が漸次上昇する結果、原料の均一供給が妨げられることとなる。

これらの現象は、従来とかくサイロの宿命として片附けられ、諦められて来た嫌いがある。

その原因は、サイロの下部排出孔が極めて小さく（サイロの直径又は辺が6～8米の場合、排出孔は30～50種程度である），その数も普通1箇であり

又底角も小さい（ $40\sim45^\circ$ が普通）ことに帰因するものと考えられる。

依って先程の茶筒の原理を応用して次のような解決策を考えて見た。即ち

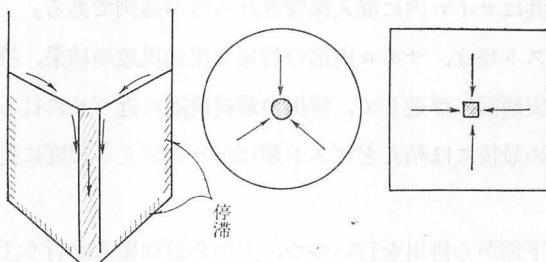
- ① 底角を出来るだけ大きくする。
- ② 排出孔の断面積を出来るだけ大きくする。
- ③ 排出孔の機能を、点から線に拡大するための補助具を設置する。（これが次に述べる均一排出装置である）

これによりサイロ内部の好ましからざる特異な流動現象を排除して、先入先出、均一排出の方向に近づけ得るものと考えるのである。

2. 均一排出装置に就いて

イ 均一排出装置の構想

私共が研究開発した方法は、排出孔直上の一筋の筒状の排出路に問題があると見て、この通路のみに依存する「一点集中転落」を改めて、排出路を輪状に増設する「周辺分散転落」に移行せしめんとするものである。



図一 6 通常サイロの流動参考図

即ち、通常の場合、排出孔直上の一筋の通路に向って、中央陥没が底面及び垂直壁面部の停滯を引き起こし、先入後出、ダスト類分離浮遊を生ずることになる。

これに対し均一排出装置として、サイロのホッパー部分に特殊な補助ホッパーを設置した場合は、陥没と転落を皆無にまではなし得ないが、排出路の延長を大きくすることによって、転落箇所を増大し、一つ一つの転落を小巾

なものとすることによって、底面及び垂直壁面部の停滞を解消し、先入先出の均一排出を実現することになる。

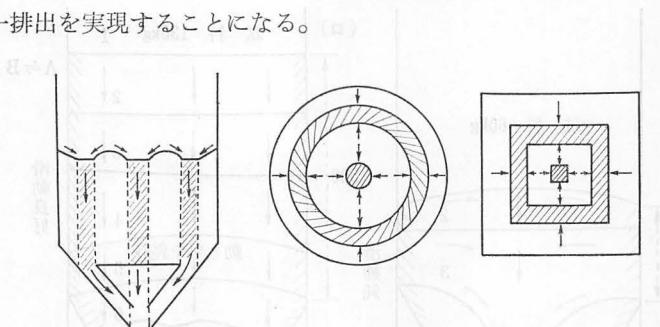


図-7 均一排出装置参考図

この均一排出装置の効果確認のための各種の実験研究を次の報告する。
(本装置は昭和44年8月実用新案登録済)

ロ) 模型サイロによる各種実験結果

前述の模型サイロに図のような補助ホッパーを設置して、排出の滑動実験を試みた。

a. 観察による結果

とうもろこし、マイロ及び大豆を模型サイロに入れ、表面を平坦に均してから排出孔を開いてその流動況を観察した結果は図-9の通りである。

1) 補助ホッパーなしの場合

従来通り(I)の結果を観察した。

2) 補助ホッパー設置の場合

内部の穀類は全体が一斉に沈下を

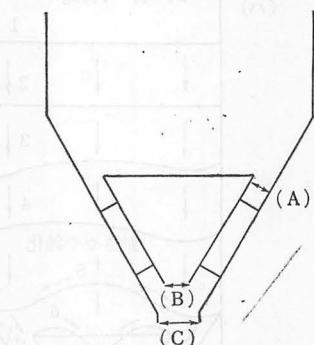


図-8 補助ホッパーによる流動実験

(A) 補助ホッパーと底面との間隔

(B) 補助ホッパー下部開口部

(C) 排出孔

起し、底面及び垂直壁面の滑動も終始良好であり、表面は平坦な状態のままで沈下する。従って中央陥没も転落も殆んど見られない。

出式入式 マイロ (とうもろこし、大豆も同様に付略)

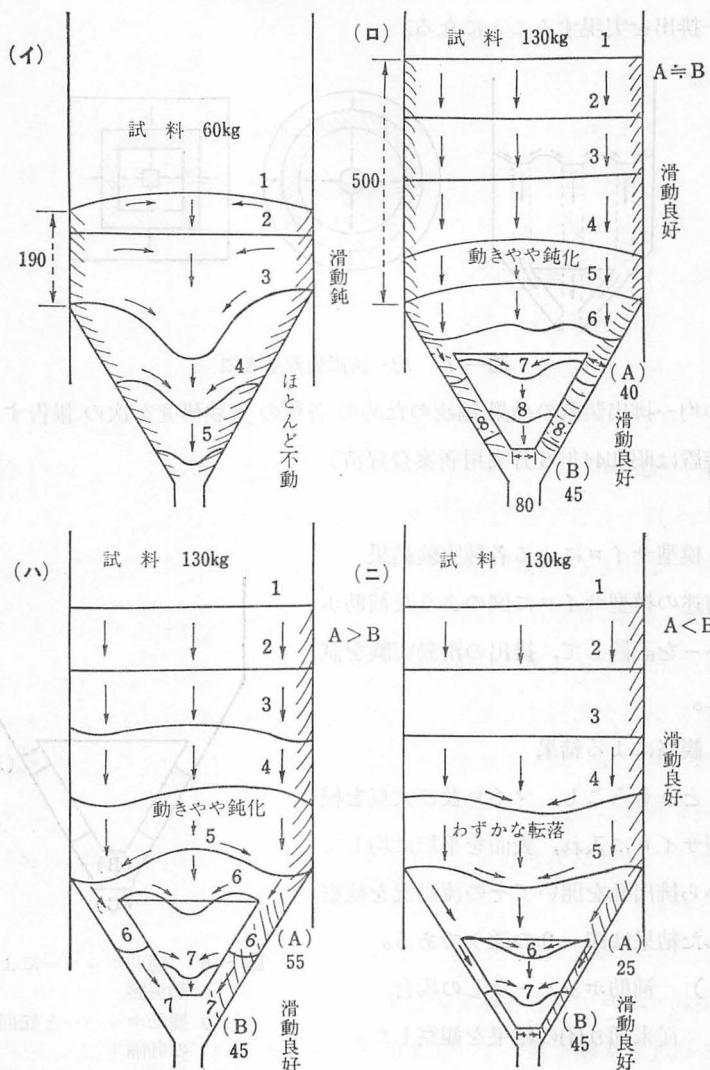


図-9 模型サイロによる均一排出装置の流動実験

3) 補助ホッパーの位置を若干動かした場合

① (A=B の場合 (図-9 の①))

半ば頃から、中央部の動きが稍鈍化するが、最も順調で補助ホッパー内と周辺部が殆んど同時に排出を終る。

② A > B の場合 (図-9 の④)

半ば過ぎから、開口部の大なる周辺部の流出が早くなり、中央部から周辺部への若干の転落を生じ、最後は底面が全部流し出しつつから、補助ホッパーの残が排出される。

③ A < B の場合 (図-9 の⑤)

半ば過ぎから、逆に周辺部の流出が鈍化し、中央部に僅かな凹みを生じ、僅かながら転落を示す。最後は補助ホッパー内が流し出しつつから、周辺部が排出される。

4) 補助ホッパーの内部では、当然中央陥没と転落を生ずるが、量的に少量であるために、悪影響を及ぼす程には至らない。

5) 全体として極端な転落がないために、ダスト類の分離浮遊がなく先入先出の傾向が明瞭に観察された。

b. 色紙散布による実験結果

次に試料を模型サイロに入れる際、50kg毎に色紙の細片を散布し、下か白、赤、緑、紫の4層にした後、一定量づつ搬出して各回毎の色紙の枚数を調査した結果は、図-10の通りである。

前記の観察結果と同様、美事な先入先出の均一排出の状況が明確に把握された。

ハ) 実物サイロによる各種実験結果

以上の研究と実験に基いて、補助ホッパー方式の均一排出装置を、昭和40年1月山下サイロに、同44年7月に新港町サイロに設置して、実用に供しつつ更に各種の実験、観察を行つて來た。

両サイロともダストの還元装置を設置し、一旦除塵、集塵したダスト類をサイロ内に再投入しているので、相当量のダスト及び雑物が混入している

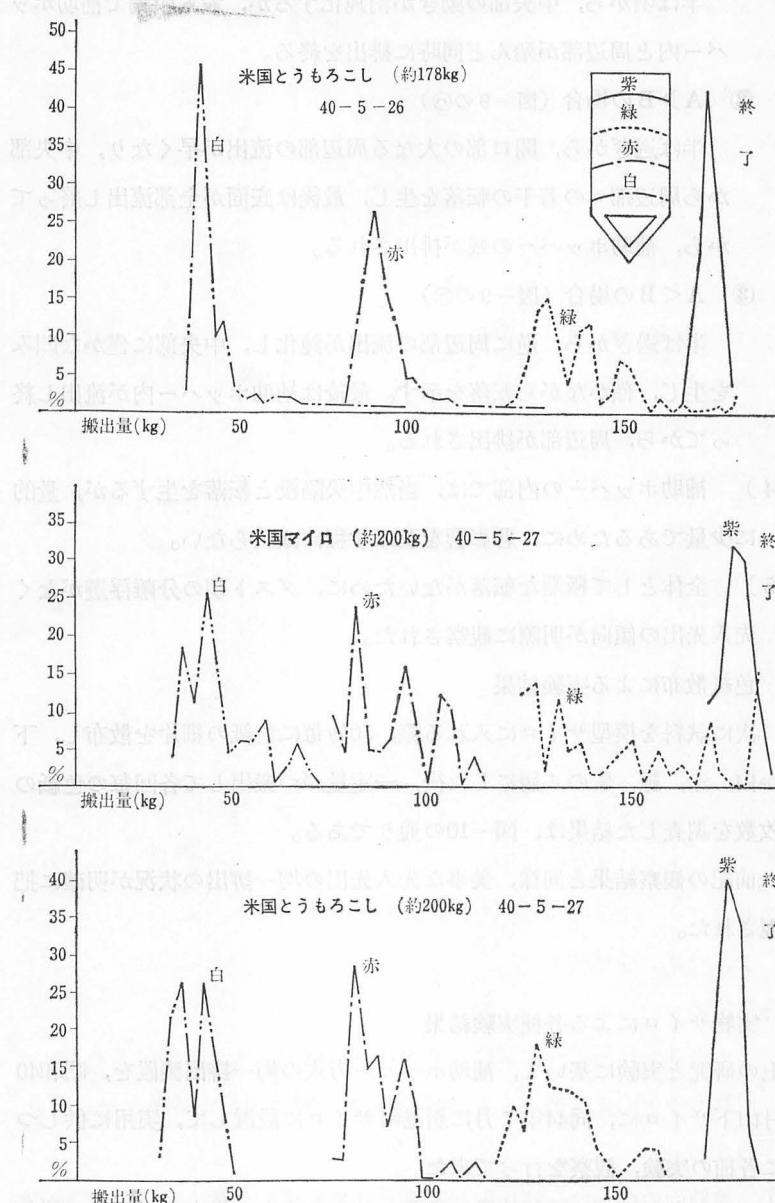


図-10 模型実験（補助ホッパー使用）（色紙散布）

にも拘らず、補助ホッパーの機能によって、一応順調に受渡が行われている。

殊に雑穀の多い輸入大麦の場合、サイロでの正確な撒受渡は極めて難しい問題であるが、昭和43年秋以来半年間のテストの後、44年4月からは本格的なサイロ保管に入っているが、これ又実用上は大した支障もなく撒受渡を行っている。

然し実物サイロは模型サイロと異り

- ① 内壁面が疎雑で摩擦系数が大きい。
- ② 内容量が圧倒的に多く、壁面に及ぼす横圧及び底圧の影響が非常に大きい。
- ③ サイロの形状と補助ホッパーの関係位置及び大きさが必ずしも一定しない。

等の為に、その内部流動は模型サイロの場合程には、理想的ではないような場合もあり、尚不明瞭な点もあるが、現在までの実験観察の結果を示せば次の通りである。

a. 屋上マンホールからの観察の結果

屋上マンホールから、排出時における表層面の動きや形状を観察し、内部流動を類推するものである。図-11がその代表例である。

「その1」は本体の排出孔800粍、補助ホッパーと底面の間隔450粍、補助ホッパー下部開口部450粍の通常の形状の場合である。

「その2」は補助ホッパー下部開口部を約3分の1閉鎖縮少して見た場合である。

「その3」は同じく下部開口部を70粍に縮少して見た場合である。

何れも多少の差はあっても、模型サイロ実験と類似の結果が見られる。

即ち

- ① 表層面の山形は、排出開始後暫くは崩れず、全体としての沈下が進む。

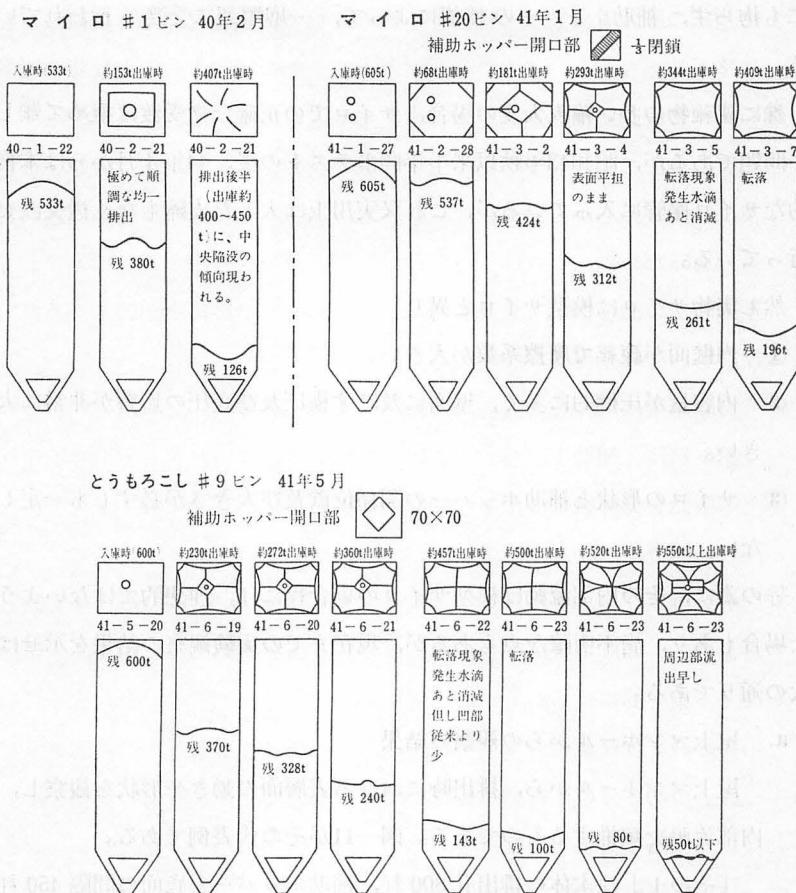


図-11 屋上からの観察結果

- ② 表層面中央部近くのマンホール、投入口直下の輪状の水滴跡は、半
ば頃（排出300～360トン程度）まで視認出来る。

③ その後表層面は、中央への陥没と転落が現われる。

④ 最後の50～60トン程度から、僅かながら容積重量が軽くなるが、ス
ケール実施には支障がないことが確認された。

b. 色紙散布による実験結果

実際に貨物をサイロに搬入する際、150屯毎に白、赤、緑、紫の順序

で色紙の細片を同数づつ散布し、約 600 塵の搬入を終らした後他のビンに移し替えながら、途中のコンベヤ上で色紙を回収、一定屯数毎の枚数を調べて流動状況を推測しようとするものである。

この方法では、各段層毎の色紙の散布が必ずしも平均に行い難いこと及び紙がどちらかと言えば穀粒よりも、ダストその他の狭雑物に近い質量であるために、これによって穀粒の内部流動を推測する上で必ずしも正確でない面のあることが解ったが、大約の流動傾向は把握し得るのではないかと考え得る。

実験結果は図-12の通りである。

第1例は、補助ホッパーの故障で、底面との間隔が著しく小さくなりその機能を発揮出来なかった場合の例である。

この場合は、先入後出の傾向が明瞭に出ている。

第2例及び第3例は、補助ホッパー下部開口部を小さく絞り実験したもので、400 塵排出頃迄の色紙の回収枚数が極めて少なく、終り頃になって集中的に、しかも各層の色紙が混合した形で出ている。従って前半3分の2位は概ね先入先出の均一排出の傾向を示し、次に補助ホッパー直上の約3分の1程度が複雑に混合した形で、先入後出的様相をしながら流出することが推測される。

c. 排出段階別容積重量割合の測定

最後に排出段階別の単位当り容積重量を測定し、それが当初に比較してどの様に通減して行くかを測定して見た。即ち通常排出と共にダスト等軽いものが浮遊残留して、最後にこれらがまとまって排出されるので容積重量は軽くなることが予想されるから、均一排出装置を設置した場合、これがどのように変化するかを把握しようとするものである。

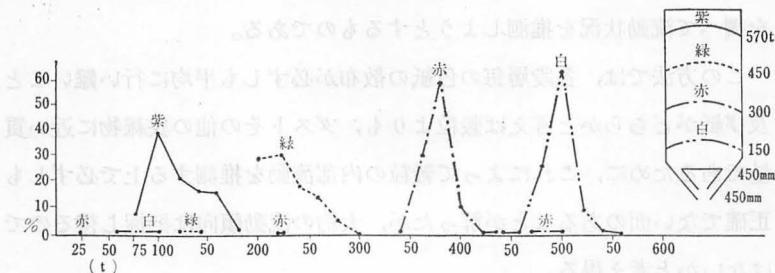
1) 模型サイロによる実験結果

前述の模型サイロによって、補助ホッパー無しの場合と、設置した場合に就いて、排出段階別の一定量 (2ℓ) 当りの重量測定を行い、

(第1例)

米国とうもろこし #6ピン→#23ピン 5月31日～6月4日庫移し

40年5月7日搬入 570t (色紙150t 毎に散布)

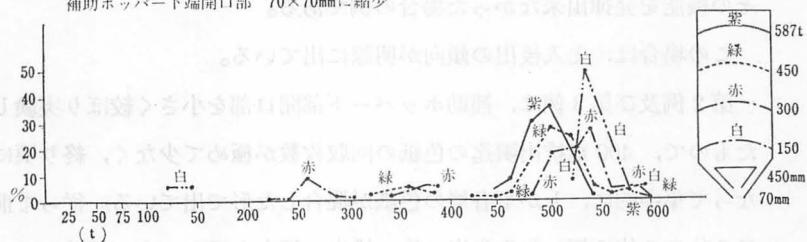


(第2例)

米国とうもろこし #9ピン→#25ピン 7月8日～12日庫移し

41年6月搬入 590t (色紙150t 每に散布、各160枚)

補助ホッパー下端開口部 70×70mmに縮少



(第3例)

米国とうもろこし #9ピン→#1ピン 8月9日～11日庫移し

41年7月搬入 587t (色紙150t 每に散布、各440枚)

補助ホッパー下端開口部 70×70mmに縮少

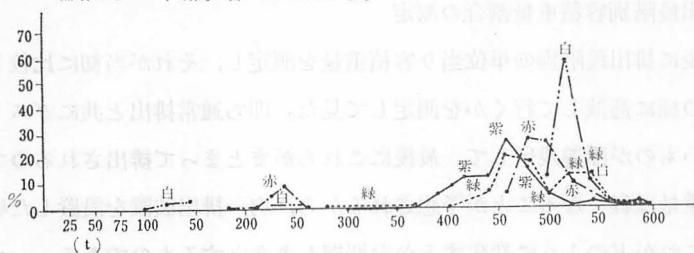


図-12 実物色紙散布実験

その変化を調べて見た。

試料は次の通りである。

① 米国産マイロ 粒子 129kg (70%) の混合物
ダスト 55kg (30%)

② 米国産とうもろこし 粒子 150kg (70%) の混合物
ダスト 64kg (30%)

③ 濱洲産大麦 通常の状態のもの 200kg

尚上記の粒子とダストの重量は次のようにマイロととうもろこしでは相当の違いがある。(夫々 2 ℥当り重量)

マ イ ロ	粒 子	1,512g (100)
	ダスト	556〃 (37)
とうもろこし	粒 子	1,456g (100)
	ダスト	1,244〃 (85.6)

実験結果は次の通りである。

表一 1 模型サイロによる実験結果

(排出前重量 100 とする)

段階	試料区分	米 国 产 マイロ		米国産とうもろこし		濱 洲 产 大 麦	
		補助ホッパーなし	同 一	同 一	同 一	同 一	同 一
排出前		100%	100%	100%	100%	100%	100%
〃 $\frac{1}{4}$ 後		96. ³	103.	98. ³	100	98. ⁷	99. ⁷
〃 $\frac{1}{2}$ 〃		93. ⁹	99. ⁵	97. ⁸	100	97. ⁸	99. ³
〃 $\frac{3}{4}$ 〃		83. ⁷	108. ⁵	98. ³	99. ⁷	68. ⁷	96. ⁹
最 終 段 階		65. ²	94. ⁶	95	100	95. ⁸	99. ⁹

即ち試料の種類により、即ち含有ダスト数の重量の程度により差違はあるけれども、均一排出装置を設置した場合の方が、しない場合よりも重量変化が少なく、概ね平衡に近い形で排出されることが解る。

2) 実物サイロにおける調査

次に補助ホッパーを設置した当社における山下サイロ及びB号サイロにおける調査結果は次の通りである。

イ) 山下サイロ

排出初期における1ℓ当たりの重量を100として、最終段階（約5屯残留程度）におけるものを表示する。

表—2 実物サイロにおける調査

とうもろこし	マ　　イ　　ロ			大　　麦	
44年3月 91%	40年3月	65%	44年9月 76.2%	14年9月	95.5%
" 99%	"	96 //	11月 76.2 //	11月	95.5 //
4月 88%	4月	96.5 //	// 76.2 //	//	95.5 //
89 //	"	97.5 //	// 77.4 //	//	100 //
平 均 91.8 //	44年9月	81 //	// 82.1 //	//	100 //
	11月	76.2 //	平 均 84.5 //	平 均	97.3 //

ロ) 新港町サイロ

排出初期における1ℓ当たりの重量を100とし、排出100屯又は50屯毎のそれを測定した結果は次の通りである。

表—3 新港町サイロにおける調査

収容屯数	500屯	500 //	550 //	600 //	600 //	600 //
残 600屯	%	%	%	100%	100%	100%
50			100			
500	100	100		100	100	100
50			100			
400	100	100		100	100	98.4
50			99.7			
300	100	99.6		99.2	100	99.
50			99.			
200	99.5	99.4		99.2	100	95.7
50			99.4		99.7	36.6
100	99.6	99.	99.1	97.	99.4	97.7
20			97.3		99.	97.5
最 終	99.	63.5	96.4	94.2	99.4	94.6

以上の結果は、実用上支障のない程度に均一排出が行われていると推定される補助ホッパーを設置した場合の調査結果であるが、遺憾ながら比較対照すべき補助ホッパー無しの場合の資料不足の為、十分な比較分析が行えないことは残念である。今後この種資料を整備すると共に、特に最終50屯以降の更に細分した段階別の調査を進めて、正確を期したいと思う。

結　　び

穀物サイロにおける均一排出と云うことは、サイロ運営上の重要問題であるにも拘らず、内部の流動を直接観察することも、実験室的実験を行うことも、ましてや実物サイロによる実験を行うことも、又模型と実物との差違を明らかにする研究も実際問題として仲々容易でない所に、問題解決の難かしさがあると思われる。殊に均一排出装置としての補助ホッパーを設置した場合は、内部流動に更に複雑さを加えるもので、今後更に実験研究を繰返し、その実体を明らかにし、模型実験に近い確実な条件と装置の完成に努めたいと念願している。

尚本装置を設置した場合の経済効果や生産性等に就いては、一般論或は抽象的には既に本文中に触れた積りであるが、より具体的或いは計数的な点に就いては未だ分析が十分でない所があると共に、事業経営上の機微な問題も含むので、敢えて割愛することとする。

今回研究不十分のまま敢えて本問題を提起したのは、問題の重要性に鑑み一日も速かに完全な均一排出装置を実現させたいからである。積極的な御指導と御協力を願いたい。