

# 穀物貯藏與乾燥

## Grain Storage and Drying

臺灣大學農工系副教授

沈 國 文

Kou-Wen Shen

### 緒 言

地球上分布各種民族，熱帶及亞熱帶水源充裕的地方栽培水稻，人們可以吃米；溫帶及亞寒帶牧草茂盛的區域牧畜發達，人們可以吃肉。人類能適應環境，運用智慧，開發天然資源，謀求自己的生存及種族的繁衍。

人類經常需要穀物，而穀物生產是有季節性。因此需要貯藏，需要保持穀物的最高營養價值。有些地方因為鳥害，蟲害，鼠害以及發霉等等原因穀物損失達三分之一以上。假如講求適當貯藏及處理方法，穀物損失可以大大地減少。世界人口不斷地增加，食糧供應更需適當地配合。臺灣努力增產稻穀，產量顯著上升，如果貯藏方法不當或乾燥無法施行，品質敗壞不能食用，那麼增產不但無益，反而造成經濟上的負擔及損失。

穀物貯藏不僅是為了維持人類生存，仍需注意穀物之營養成分，有些發霉糧食常含毒素，國外禁止銷售，即使供作家畜及家禽的飼料也在限制，常需銷燬。政府嚴格管制穀物品質，保護人民健康。維持穀物品質可以增加產品的價值，等級差的穀物價格較低，因之農民收益減少。市場價格有時並不合理，如果生產穀物立即銷售，常會無利可圖，甚且低過生產成本。穀物貯藏可以調節供需之外，尚可於有利之市場價格時出售，以符合最大經濟利益原則。

現代人知道如何在某種特殊情形下可以貯藏大量穀物而能維持一定品質，時常備有通風冷卻及加熱乾燥等等作業。貯藏的穀物是有生命的活體，貯藏期中為休眠狀態。若能維持穀物休眠程度最大，穀物品質發生變質最少。穀物成熟後，胚芽部份繼續需要呼吸，其他部份宛如無生物一樣，穀物由周圍空氣中吸氧與氧作用，產生熱，水氣及二氧化碳。穀物收穫時常染有各種微生物，如黴菌及酵母菌於適當情形下開始活動，破壞穀物作為微生物自身的生長劑，呼吸作用

旺盛，發生多量之熱，水氣及二氧化碳，較諸穀物之呼吸作用為甚，且因熱及水分增加，更加速穀物呼吸作用。穀物除呼吸作用之外，仍有化學變化發生，所含酵素有如一有機觸媒劑，使不溶性物質變為可溶性，加速澱粉轉變為糖，發酵，蛋白質轉變為氨基酸或其他形式的產物，脂肪分解為遊離酸等等反應。其他蟲害對穀物影響不小，同樣造成損失，約占總量的5%。

### 穀物變質

穀物生長成熟後，開始變質，收穫貯藏期中為休眠的安定生理狀態，一部份繼續呼吸，體內進行澱粉轉化為糖分，與氧作用產生熱，水氣以及二氧化碳洩出體外。反應如下：



每克分子量重的澱粉，穀物乾重約180克，可生264克重的二氧化碳，108克的水氣，673 Kcal 熱量，平均每克重二氧化碳發生時同時產生 0.409克水氣，2.549 Kcal 熱以及消耗穀物0.681克乾重。因之穀物水分含量增加，溫度升高以及穀物乾重減少。穀物除生理原因外；尚有生物的原因，如微生物，昆蟲及鼠類之為害；物理的，如濕度及溫度的影響；化學的，如水分，酵素及氧化等作用以及損傷種子發芽力及生長力等的原因。

1. 微生物：——穀物或多或少均曾感染微生物，微生物它能分泌消化液，分解穀物產生有機物，使穀物變質不宜食用，甚者有時含有毒素。

a. 肉芽菌：——靠孢子繁殖，如黴菌及酵母，黴菌形成肉眼可見的網狀線絲組織，促使穀物發生化學變化適於黴菌生長。酵母菌始終是單胞生長，需用顯微鏡方能觀察，繁殖迅速，常可取代黴菌及抑止其他微生物之生長。食物有時利用醱酵方法而貯藏，如製造酒醋之原菌。

b. 分裂菌：——包括不移動的細菌，有運動器官

的桿狀菌，有些可產生醋酸，有些會發生乳酸，常用以製造乳酪品及糧秣之調製。

2. 酵素：——穀物品質變惡，除了受微生物作用外，酵素作用更為利害。酵素屬於植物及動物體組織內之特種蛋白質，可加速化學反應維持生物之生存，生物死後，許多酵素繼續作用促使其組織分解，如果僅係酵素分解組織，稱之屍解；若除酵素作用外尚有微生物參與分解時，稱之組織腐朽。酵素與微生物之主要區別，酵素存在生物組織內無法消除，而微生物起於感染可以適當方法處理，可以消除或減低其等影響，穀物如經適當方法處理，酵素活動可以大量地降低。

3. 害蟲：——貯藏穀物中害蟲約有八十餘種，品害損失很大，有時尚無法完全避免。害蟲繁殖力強，舉例言之，穀象雌雄一對如果環境適宜五個月間可以繁殖1250萬匹，但因生存條件並不理想以及天敵存在，繁殖約為2000只左右，破壞穀物加速品質劣化。

4. 鼠害：——穀物貯藏中為害鼠類約有五類，造成損失高達百分之三。

## 穀物貯藏

### 1. 品質影響因素：

a. 水分含量：——穀物水分含量高呼吸作用增加，同時促進微生物之繁殖，特別如好氣性的黴菌，細菌，發生多量熱量，水氣及二氧化碳，如此又可加速生物之繁殖，穀物的呼吸，惡性循環，問題更形複雜。但因大量產生二氧化碳有抑制呼吸作用，溫度很少會超過 35°C。

溫度不超過 60°F (15.5°C) 的水分含量低於14%，可以抑止蟲害，低於13%，可以防止黴菌發育，低於11%不易產生蟲害，低於9%，可以免除蟲害（僅對甲蟲 *Kaphra beetle* 為例外）。一年貯藏期穀物安全水分含量玉米，小麥，燕麥，帚蜀黍等為13%，水稻為13.5%，大豆為11%，亞麻仁為8%，牧草為20%。

b. 溫度：——溫度增高穀物化學作用及生理反應加速，然於溫度接近 200°F 時，酵素反應即行停止。貯藏穀物之呼吸作用伴隨溫度升高而增加，穀物呼吸及微生物等作用更增加熱量升高溫度，高達 170°F 時，是以殺死微生物。長期貯藏穀物，最好維持溫度在 40—45°F 範圍內，使穀物呼吸率降低，害蟲減少活動，溫度在 50°F 以下多數害蟲不能繁殖。設若貯藏溫度達到 0°F，即使穀物水分含量很高，亦可無限期

的貯藏，目前尚無法維持溫度 0°F 大量貯藏穀物。

各種溫度下穀象成蟲活動能力觀測情形為 30°C (86°F) 活動性最強，繁殖最適；20°C (68°F) 活動能力不如 30°C 時強，仍對貯藏穀物具有危險；15°C (59°F) 活動遲鈍，繁殖幾不可能；10°C (50°F) 不能行動，繁殖完全停止；5°C (41°F) 完全不能活動，幾乎形同死蟲。

黴菌生育最適溫度為 25°—35°C，最高溫度 40°C，最低溫度為 0°C (*Penicillium* 屬於 0°C 以下溫度仍可生長為例外)。黴菌生長羣的直徑 15°C 100 小時為 3cm，200 小時為 10cm；18°C 50 小時為 1.5cm，100 小時為 6.5cm，150 小時為 12cm；20°C 50 小時為 2.5cm，100 小時為 8.5cm，125 小時為 12cm；25°C 50 小時為 5cm，75 小時為 9.5cm，90 小時為 12.5cm；30°C 50 小時為 7.5cm，75 小時為 12.5cm。

據河野常盛氏報告各種溫度下糙米發霉率(1)貯藏期 7 個月糙米水分含量 16.4%，15.5%，13.2% 常溫貯藏時發霉率各為 76.8%，12.5%，0.8%，而貯藏溫度為 20°C，15°C 及 10°C 時，均未發霉。(2)貼藏期 21 個月時，糙米水分含量 16.4%，15.5%，13.2% 常溫貼藏時發霉率各為 90.0%，55.0%，13.0%，而貼藏溫度為 20°C，15°C 及 10°C 時，發霉率均等於零。

c. 氧氣供給：——穀物貯藏中如果水分含量高，呼吸作用增加，引起穀物變質。呼吸作用需氧供給，假如貯藏穀物排除氧氣，因此穀物及好氣菌的呼吸作用可以停止，沒有氧氣時，酵素的氧化燃燒亦會停止，穀物倉該完全氣密。但需注意高穀物水分含量及貯藏溫度，穀物變質，不會缺氧供給而中止，嫌氣菌仍可於無氧中，進行異常呼吸，加速穀物敗壞。有時高水分含量之新鮮牧草中添加細料，置於無氧槽中，產生化學變化，特別釀醉，發生良好風味之糧秣飼料，尚無市場銷售，因是畜牧業者自家製造的最佳飼料之一。

d. 穀物狀態：——穀物能夠貯藏的能力，與穀物以往歷史有關。穀物天生有保護種子的種皮，變質抵抗力與穀物收穫成熟度及水分含量有關，如果穀物由於機械或受高熱損害，則較健全穀物容易感染黴菌及害蟲侵襲，抵抗力均有減弱的傾向。

e. 變質指數：——穀物貯藏期間產生熱，水氣及二氧化碳，已如前述與穀物乾重的減少有一定之關係，測定其中一種因素，即可瞭解穀物變質的情形。進

一步研究人工環境，增長穀物貯藏期限，可減少及避免損失。穀物發生之二氧化碳可以代表穀物變質的程度，二氧化碳重量多少即可以數值表示稱之變質指數。據 Saul 氏稱田間脫粒的玉米每公斤乾重產生之二氧化碳不超過 8 克時，換言之即穀物乾重損失低於  $0.681 \times 8 \times 100 / 1000 = 0.5448\%$ ，或 0.5% 時，並不影響品質，仍可安全乾燥貯藏，以此標準換算玉米各種溫度及水分含量下，安全貯藏極限時間表如下：

各種溫度下玉米各種水分含量安全極限貯藏期表  
(單位：天數)

貯藏溫度 °F	穀物水分含量 %			
	15	20	25	30
75	115	12.1	4.3	2.6
70	155	16.1	5.8	3.5
65	207	21.5	7.8	4.6
60	259	27	9.6	5.8
55	337	35	12.5	7.5
50	466	48	17	10
45	725	75	27	16
40	906	94	34	20
35	1140	118	42	25

如果超過上表所列時間，穀物即會生霉變質造成損失，且使品質等級降低。穀物成熟度與收穫期水分含量有一最適關係，亦是影響品質，花生最適收穫水分含量範圍為 20-30%；水稻為 20-26%。玉米品質影響最為敏感，據 Steele 等稱田間脫粒玉米水分含量 18.8-28%，於 65°F 下與經過時間發生之二氧化碳重量關係如圖(1)；以 65°F 為標準(變質比率 = 1)與各溫度之變質比率 ( $R_T$ ) 關係如圖(2)；及以水分含量 25% 為標準(一般玉米收穫時水分含量，變質比率 = 1)與其他水分含量之變質比率 ( $R_M$ ) 關係如圖(3)，具有下列關係

$$t_m = \frac{t_R}{(R_T)(R_M)} \dots \dots \dots (1)$$

式中： $t_m$  = 穀物於某水分含量及其溫度下產生某重量二氧化碳所需之時間，(小時)

$t_R$  = 65°F 產生某定量二氧化碳所需之時間，(小時)

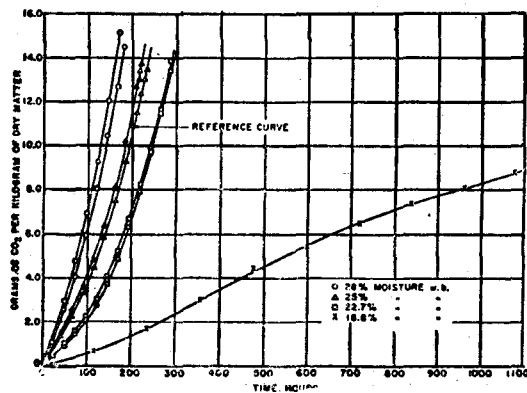
M = 水分含量百分數，(濕重基準)

T = 溫度，(°F)

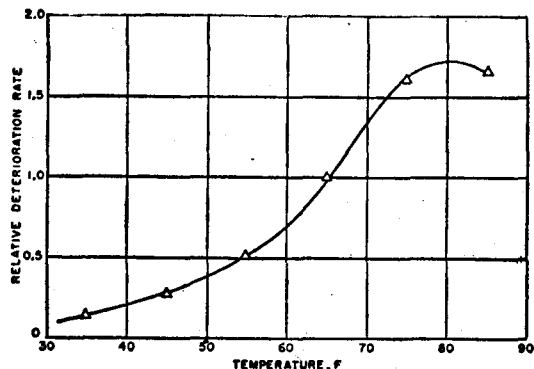
$R_T$  = 溫度相對變質比率

$R_M$  = 水分含量相對變質比率

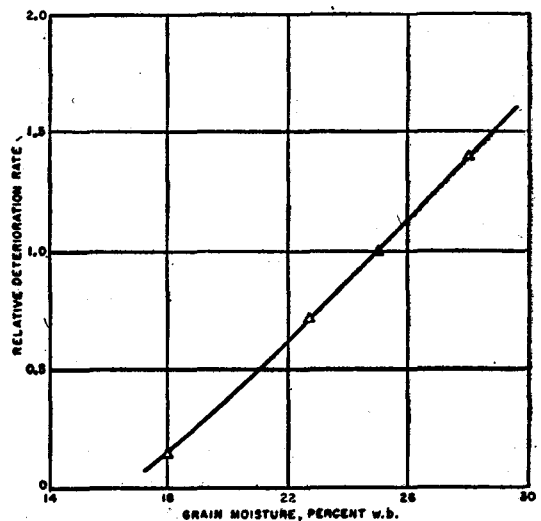
根據圖(1-3)及公式(1)即可預測田間脫粒玉米的安全乾燥有效期限。玉米是美國主要作物之一，品質問題最多，研究已有成績。臺灣水稻問題有相似之關係，吾人可以採用上述方法於收穫期間，計劃緩急先後施行乾燥，充分利用穀物安全有效期限，及部份人工乾燥而不影響品質。



圖(1) 田間脫粒玉米 CO<sub>2</sub> 發生量



圖(2) 溫度相對變質率



圖(3) 水分含量相對變質率

2. 貯藏方法：——已如上述穀物貯藏受酵素，微生物及貯藏時間等影響，品質變壞。吾人可以人工環境減緩或防止此項為害情形。

a. 防止感染：——穀物若無微生物之存在，則不會為害。收穫，加工，貯藏輸送時不損傷種皮，清潔容器，除去塵污，設法選除受傷的部份，免除容易感染菌種的機會。有時密封包裝保護穀物，貯倉基礎不宜吸濕浸潮，有時離底採用另層鐵絲網底便利貯藏期中通風冷卻，及有效防止鼠類進入，穀倉採用密封可以完全控制。

b. 低溫：——穀物酵素作用純粹是一化學作用，其反應率隨溫度降低而減小，微生物是一活體，其能活動溫度範圍很小，在充分低的溫度下呈休眠狀態。溫度低下時穀物貯藏期限大都可以延長，有些食物可以利用冰凍貯藏，但對某些農產品過分低溫反屬有害，如 56°F 以下時香蕉外皮變黑；40°F 以下時馬鈴薯中澱粉部份糖化；有時也會使蘋果傷風，生理異常發生銹點；此等均能降低產品價值。

c. 除去水分：——微生物發育需要水分，穀物乾燥脫水，保持乾燥可使微生物活動休止。同時水分減少，可溶性的固體濃度相對地增高，因之滲透壓增加，細菌對滲透壓抵抗力弱，15% 水分含量即可抑止（黴菌有時於 13% 時仍可生育）。

d. 防止水分消失：——穀物乾燥脫水可以長久保存，有時過分失水結構破壞，物質硬化風味不佳，且損失的水分即為穀物重量之損失，農民收入減少。採用人工環境，保持相當濕度低溫低流速的空氣，以減低穀物呼吸作用。甚之出售時加濕處理，符合標準水分含量，獲得合理利潤。

e. 藥劑處理：——一般害蟲及微生物之繁殖可以適當的化學藥品處理而阻止。常用燻蒸方法處理，使用藥劑如 Chloropicrin ( $\text{CCl}_3\text{NO}_2$ )，Methyl Bromide ( $\text{CH}_3\text{Br}$ )； $\text{CS}_2$ -gas, Phostoxin ( $\text{PH}_3$ ) 等，可防止穀物生霉及蟲害；然殘留臭味，品質變劣，強度減弱易脆，色澤不鮮，發芽力及生命活力大幅消退等等不良影響。噴霧千分之五的 Cycloheximide (or Actidion) 水溶液可以防止鼠類接近穀物。

f. 加熱處理：——加熱處理可以殺菌，曝曬於高溫蒸氣或其他加熱媒質中短暫時間，足可消滅大部份微生物，及使酵素活性喪失或阻止微生物之繁殖，因之穀物減少變質。但需注意過熱使穀物變質，維他命損減，氨基酸蛋白質利用度降低，小麥製粉為難，產

量減少以及製成豆腐品質產量均差。

g. 屏除空氣：——穀物酵素作用是一種氧化，多數微生物需氧生存，若能除去空氣，真空貯藏或人工減少氧氣增加二氧化碳，可以降低或部份控制酵素及微生物之作用。人工環境貯藏亦多困難，如需完全氣密的貯倉，高濃度二氧化碳雖可阻止腐朽，但可能破壞幼胚，且對嫌氣菌不能控制，操作者常需注意安全，及需特殊控制，檢驗及維持設備，增高費用。

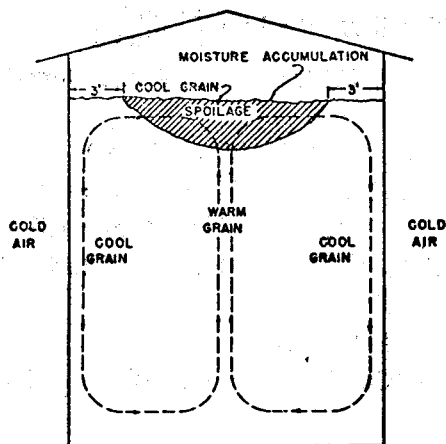
h. 醱酵：——某類酵母菌或細菌可使碳水化合物轉變為具有對其他微生物有防腐作用之有機物，先於適宜環境中培植此類自然存在的微生物，使其加速自然繁殖，有時需外加特別細菌培植。如釀造，奶酪製品。

i. 臭氧與日光：——臭氧中含三個原子氧，性質不安定分解為初生態原子氧，為強烈之氧化劑，殺菌力極強。日光中紫外線照射可以殺死微生物；殺菌燈發射約為 2537 Å 波長的輻射紫外線可以殺死細菌。利用臭氧及紫外線均可阻止微生物之繁殖，同時可以保持適當的濕度，防止穀物及其他農產品脫水發生。

j. 其他可能有效的貯藏方法：——利用放射線照射處理，穀物維他命  $B_1$  及  $B_2$  不因照射而損失。殺死害蟲照射量約需 2.5 萬 Rep；細菌 50 萬 Rep；黴菌及酵母菌 100 萬 Rep，細菌孢子 200 萬 Rep。亦有利用鈷-60 照射殺蟲僅需 1 萬 Rep，微生物十萬 Rep 可消滅 87—96%，試驗照射量似嫌不足。常用木材燻烟不完全燃燒產生含有殺菌成分甲醛及石炭酸性的氣體，殺死細菌或阻止其等生育，尚有抗脂肪酸化作用有防腐效果。利用過熱蒸氣加熱，加壓，蒸發及乾燥同時進行，製作牧草餅。穀物乾燥似可應用。許多貯藏處理方法可能由於目前技術上發生困難，或因費用昂貴不合經濟。將來研究發展新的價廉設備可供農產品應用。

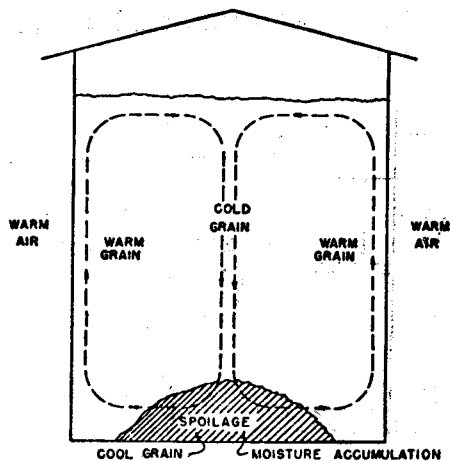
3 貯倉：——可分常溫，低溫及準低溫貯倉，最普通而數量最多者為常溫貯倉，溫度，濕度受自然條件影響，高溫多濕的季節，每年燻蒸 2—3 次，防治病蟲害，常使貯藏穀物品質惡化，常溫貯倉發生品質問題最多。低溫貯倉穀物貯藏溫度約為 10—15°C，相對濕度 70—80%，合乎經濟實用原則；準低溫貯倉為短期貯藏，可利用現有之常溫倉庫增添防熱材料，維持貯倉溫度 20°C，濕度 70—80%，節省新造費用。

常溫貯藏穀物受每日溫度及季節氣象條件的影響，穀物本身對熱傳導速度緩慢，受大氣溫度影響約遲後一個月，穀物水分含量常向冷面移動見圖(3)及(4)，



Courtesy of Agr. Consulting Assn.

圖(4) 貯穀溫度高，大氣寒冷，槽中對流情形



Courtesy of Agr. Consulting Assn.

圖(5) 貯穀溫度低，大氣溫暖，槽中對流情形

欲維持貯穀全體溫度均等，常需通風。據 Hall 分析貯藏穀物中各層溫度受大氣溫度變化之影響，關係如下

$$T = T_0 \cdot \exp\left[-X\sqrt{\frac{\pi}{\alpha P}}\right] \left[\sin\left(\frac{2\pi\theta}{P} - X\sqrt{\frac{\pi}{\alpha P}}\right) + T_m\right]$$

式中：

- T = 某層穀物之溫度
- T<sub>0</sub> = 溫度變域半數
- X = 穀層深度
- P = 溫度變動周期

$\theta$  = 時間，(小時)

$\alpha$  = 熱擴散率

T<sub>m</sub> = 平均外界變動溫度

a. 散裝與袋裝：——穀物為了避免底層潮濕及需通風換氣，常需離地面高約 30—40Cm 架設底盤，堆積袋裝穀物（糙米每袋重60公斤），堆積高度約為 6.5 公尺，穀物倉庫每坪（3.3 平方公尺）可堆置80袋，計重 5 公噸左右。堆積方式除了充分利用空間體積，仍需注意通風，搬運卸裝等操作方便，尤需注意穀物新陳先後次序，確保品質。

大量貯穀多採用散倉，貯槽多圓筒型係鋼板或鋼筋混凝土製成。普通高度20呎，直徑20—50呎，有時高度可達20公尺以上，直徑可達30公尺左右，高度高者直徑往往較小，高度低者直徑可能較大。數座貯槽成排設置，可以節省基礎工程費用，容易調節穀物卸裝操作，利用空氣輸送，有時輸送距離有達2300公尺，輸送量每小時達150噸，常用每座容量約500噸。散裝除利用空氣輸送外，亦可利用皮帶，螺旋，鏈斗及鏈條等機械方法輸送，節省勞力很多。

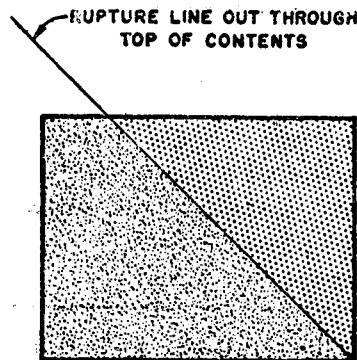
b. 淺槽與深槽：——淺槽指穀物破壞線通過穀物頂面見圖(5)，深槽指穀物破壞線通過貯槽側壁而在穀物頂面下見圖(6)。破壞線角度(x)實用上採用穀物安息角( $\phi$ )，真實值與穀物內部摩擦係數( $\mu$ )及穀物與槽壁摩擦係數( $\mu'$ )之關係如下

$$\tan x = \mu + \sqrt{\mu \frac{1 + \mu^2}{\mu + \mu'}}$$

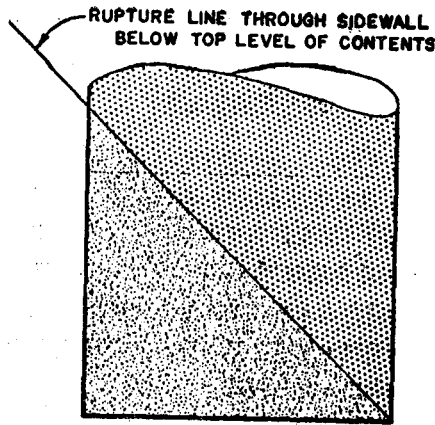
深槽可用 Janssen's 公式計算

(1) 穀物各種深度下對槽壁之側壓力為

$$L = \frac{wR}{\mu'} (1 - e^{-k\mu'h/R})$$



圖(6) 淺 槽



圖(7) 深 槽

(2) 穀物各種深度下垂直壓力為

$$V = \frac{wR}{k\mu'} (1 - e^{-k\mu'h/R})$$

(3) 穀物作用槽壁上總垂直負荷為

$$wR \left[ h - \frac{R}{R\mu'} (1 - e^{-k\mu'h/R}) \right]$$

式中：

L = 穀物側壓力, psf

w = 穀物重量 lb/cu. ft.

R = 水力半徑, 圓筒  $D = 4R$

h = 穀物深度, ft

V = 穀物垂直壓力, psf

k = L/V, 玉米  $k = 0.654$ ; 小麥  $k = 0.6 - 0.67$ , 水稻  $k = 0.48$ 。據 Rankine 土壓論係數穀物內部摩擦角 ( $\phi_1$ ),

$$k = \frac{1 - \sin \phi_1}{1 + \sin \phi_1} = \cot^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi_1}{2} \right) \text{ 可}$$

以估計 k 值, 當以實測為準。

$\mu'$  = 穀物對槽壁之摩擦係數如下表

穀物	木板壁	鋼板壁	粉抹水泥壁	磅/立方呎	$\phi$
水稻	0.44	0.41	0.52	41.6	36
玉米	0.308	0.374	0.423	44.8	27
燕麥	0.369	0.412	0.466	25.6	32
小麥	0.361	0.414	0.444	48.0	28
大豆	0.322	0.366	0.442		

淺槽可用 Rankines 公式計算

(1) 槽底側壓力  $L = wh \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$

(2) 每呎槽壁總壓力  $P = \frac{1}{2} wh^2 \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$

作用圓筒貯槽壁上每呎高度之周向張力 (hoop tension) 為

周向張力 =  $LD/2$  (式中 D = 槽徑, ft)

深槽貯穀如果高度超過槽徑 3 倍以上時, 很少會增加單位垂直及側壓力。粒狀穀物不完全與流體性質相同。此時所有穀物重為軸向負荷均作用於槽壁。貯槽平底上總負荷為

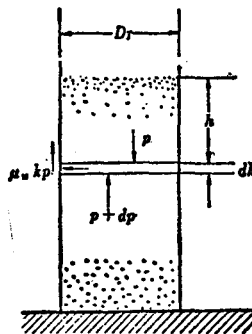
槽底負荷 = 斷面積  $\times V$

若為漏斗狀底則需另加漏斗部份所含之重量計算之。

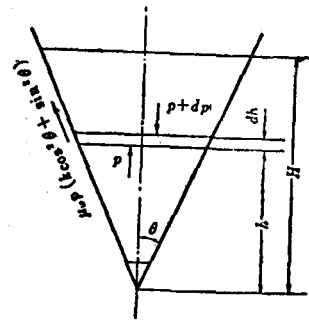
又貯穀深度超過槽徑倍以上時, 槽壁每呎承荷為

$$P\mu' \cong wR \left( h - \frac{R}{k\mu'} \right) \quad (P = \text{作用槽壁側壓力})$$

槽壁總支承負荷為  $P\mu'$  與貯槽圓周長度 (ft) 之乘積, 槽底承擔負荷等於穀物總重量減去垂直作用槽壁上之負荷。



圖(8)



圖(9)

c. 自然穀流與穀流停止：——貯槽中散裝穀物, 如果乾燥、清潔、顆粒整齊、槽底出口設計正確、重力作用可使穀物自然流出, 某些穀物一瀉千里形成沖流。穀物由周邊向中央而向下流出口稱之漏斗流; 穀物沿槽壁下降經槽底流出口為整體流。貯槽裝卸穀物, 難免發生偏析, 穀流型式最好能再行混合、保持品質粒度均等。據 Jenike 稱穀流型式與(1)穀物流動性(2)穀物有效摩擦角(3)穀物與槽壁摩擦係數等有關; 又稱與(1)槽底漏斗供給器上垂直負荷(2)穀流時作用漏斗面上垂直力(3)漏斗面切線方向力等有關; 穀物弧狀表面及空心表面的壓力強度及剪力強度大於所加應力, 穀物位置不易破壞, 因之穀流停止, 形成架橋或中空現象。

貯槽漏斗角度  $\theta$  較穀物流出角 (angle of approach)  $\beta$  為小時, 穀流為整體流 (mass flow),

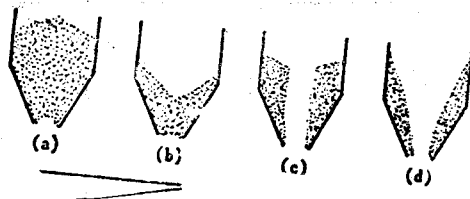


圖 (10) 架橋現象

但漏斗流 (funnel flow) 與漏斗角度  $\theta$  無關，流出速度變域大，容易堵塞，流量不定，宜採用整體流，普通可用兩種方法達成，一為中央放置有孔管，一為流出口正上方放置圓錐體，以承擔部份壓力，使出口處穀物不受壓力作用，同可免除架橋現象。

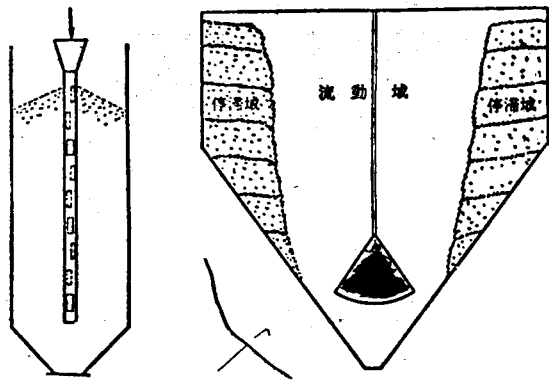


圖 (11) (兩圖合稱)

據 Brown (1965) 水稻流出角  $(\beta_1=48^\circ, \beta_2=48^\circ, \beta_3=32^\circ)$ ，流出速度與出口口徑的 2.6-2.7 次方成比例。穀物強度形成原理為於漏斗上關閉瓣未開啓時，承受穀物本身高度壓力壓實，放置愈久穀物愈加堅實。據 Jenike 稱穀物崩潰強度為露出表面無壓力之函數，決定穀物之流動性，又負荷下剪應力與穀物流動時主壓力之關係決定穀物有效摩擦角。此角度常大於穀物內摩擦角。

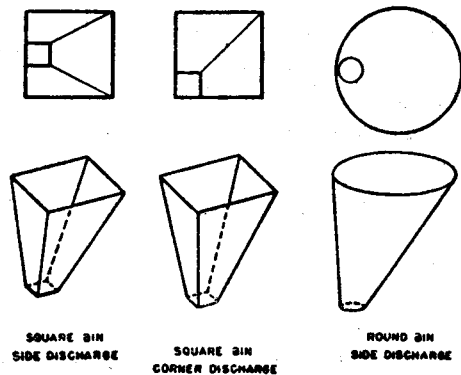


圖 (12) 各式偏斜漏斗流出口

解決架橋之方法，仍需研究，經驗常用方法如下

(1) 底層漏斗流出口不居中央，偏居一邊或一角，穀物流暢，不易形成弧形出口。

(2) 出口上方中央加分隔板，促使分隔板兩邊穀物不對稱，不易架

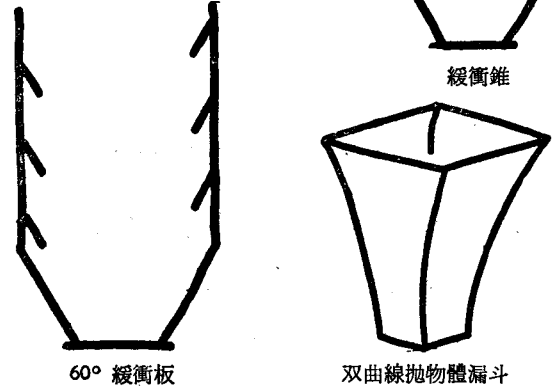


圖 (13) (說明 3 個圖合稱)

橋，但因隔板增加了摩擦力。

(3) 槽周增添 60° 緩衝板 (baffle)，或槽中分布錐狀物，均可防止架橋現象發生。

(4) 漏斗出口改為雙曲線拋物體，使穀物滑離通暢，不生架橋。

(5) 漏斗外面出口端沿斜面向上處裝置振動器，使穀物流暢。

(6) 其他許多有效機械方法，確保穀物品質均一，流量一定如圖示

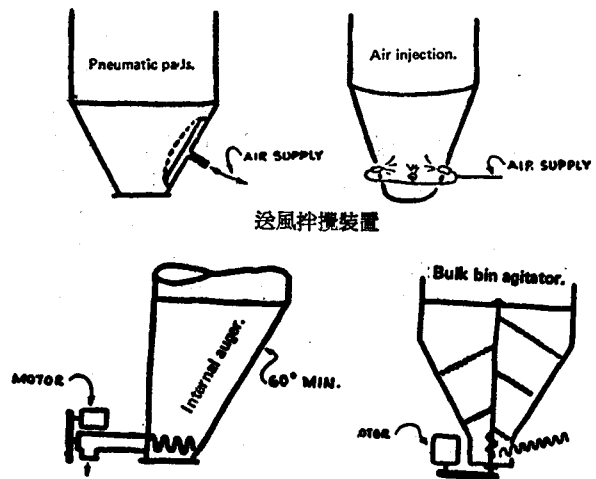
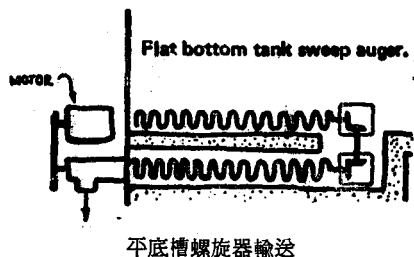
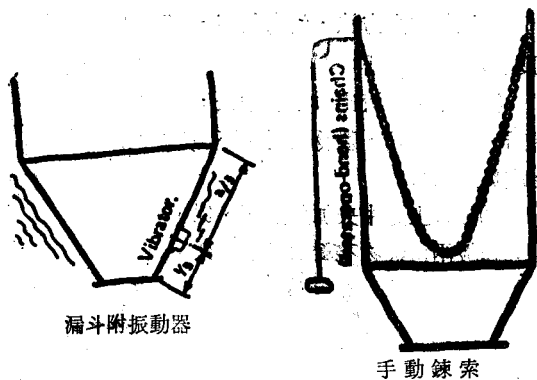


圖 (14) (說明 7 個圖合稱) 機械拌攪裝置及輸出



d. 低溫倉庫：——穀物呼吸自然消耗體力，高溫（30-35°C）時更加旺盛，體力消耗激烈。低溫可抑制穀物呼吸，防止因體力消耗老化現象發生。另穀貯中害蟲如穀象成蟲活動能力，已如前述 30°C 最活潑，20°C 尚具影響，15°C 幾乎不能繁殖，可視為害蟲繁殖臨界溫度。據河野常盛氏抑制水稻呼吸作用及害蟲繁殖溫度 15°C 即可，13°C (55°F) 更為安全，倉庫溫度對貯穀物品質而言愈低愈好，然冷溫貯藏中相對濕度降低重量減輕。據內藤廣氏貯藏溫度 15°C 穀物水分含量 14.5%，可以防止害蟲及黴菌繁殖。穀物平衡水分含量 14.5%，貯倉中空氣平衡相對濕度需要 71%，相對濕度低於 71%，穀物貯藏安全，相對濕度減低穀物水分含量同時減低，因之穀物重量減少，故宜維持空氣中相對濕度 70% 以上，圖示空氣中平衡相對濕度%與穀物平衡水分含量%之關係。（貯藏溫度為 15°C）又據齊藤氏氣體濕度圖上（或稱氣候圖）之黴菌發育界限曲線，穀物貯藏溫度 10-15°C 及濕度 70-80% 條件下，黴菌不能發育。貯藏倉庫內溫度應設法分布均勻，否則水分會移向低溫區域及高溫區域失水。如圖 16 A 點為倉庫調節之溫度 10°C 及相對濕度 80% 之狀態。假如某些原因使溫度增高為 15°C B 點時，此時相對濕度減為 60%，空氣比較乾燥，因而穀物開始失水減少重量。

據河野常盛氏對低溫倉庫水稻貯藏實地觀測結果如下

(1) 於低溫 15°C 以下，穀物水分含量 15% 以下時

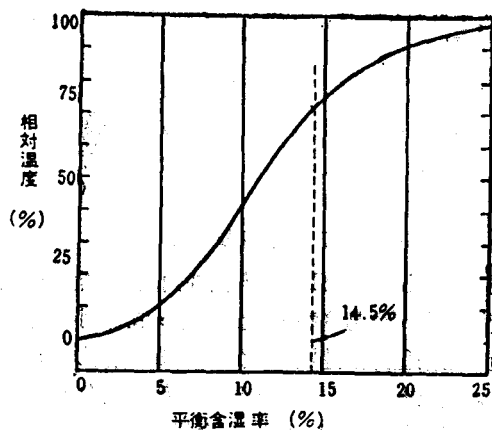


圖 (15) 穀物水分含量與相對濕度 (15°C)

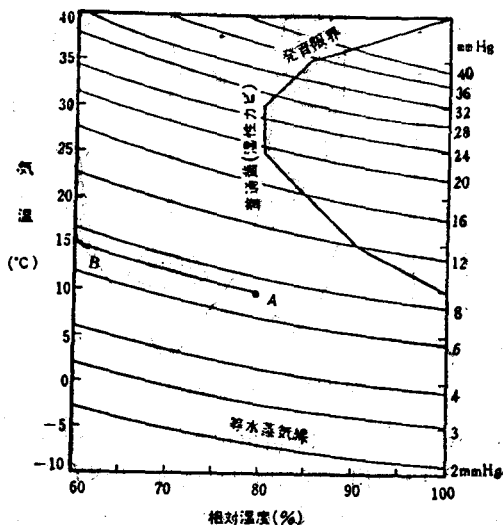


圖 (16) 黴菌發育界限曲線

呼吸作用休止，體力消耗中止。

(2) 於低溫 15°C 以下，穀物水分含量 15% 左右，貯藏二年半後，發芽率仍達 80%，對照常溫貯藏六月後發芽率僅 25% 左右。

(3) 於低溫 15°C 以下，穀物水分含量 15% 以下貯藏，害蟲及黴菌繁殖均能防止；即使水分含量達 16-17% 時，穀物品質仍少惡化。

(4) 低溫貯藏穀物呼吸作用休止，維他命及其他營養分消耗很少。

(5) 不需燻蒸，穀物品質不受影響，且節省燻蒸費用。

(6) 低溫貯藏穀物品質變化很少，貯藏二年半後品味與新稻無甚差別。

(7) 低溫貯藏，穀物加工容易，碎粒減少，精白米產量增高。



(8) 低溫倉庫較普通溫倉庫節省通風，燻蒸以及操作等通道空間，因而穀物容量增加 20—30% 利用率。

(9) 低溫倉庫調節庫中濕度，維持穀物水分含量一定標準，而不減少重量。

(10) 低溫倉庫因為氣密，管理比較容易，溫度濕度可以自動調節控制，工作人員減少。

(11) 低溫 (10—15°C) 倉庫容易管理，常人亦可經營。

(12) 低溫倉庫防熱系統如果設計正確，冷凍負荷不大，冷凍設備，運轉費用最合經濟。

(13) 舊穀品質差，市場價格低，低溫貯穀雖經一年半，穀物售價不低，商業販賣絕對有利。

(14) 低溫貯藏穀物，其副產品品質不劣，如米糠油的油質很少不良影響。

(15) 低溫貯穀，品質變化較少，無蟲霉感染，不產生毒素，營養分很少損失，對人體健康裨益很大。

### 穀物乾燥利益

休眠穀物於適當溫度及水分含量時，開始分泌強力酵素，分解體內物質，使不溶性的物質變為可溶性，胚芽準備發芽。各種微生物需水分生育，乾旱耐力細菌最弱，酵母、黴菌次之，孢子最強。乾燥減少穀物水分含量達一標準，可使某類微生物不能繁殖生育，保存品質。其利益如下：

1. 穀物收穫期可以提早，穀物成熟時水分含量尚高時即可早期收穫，增加農時有利次期作物栽培整地，同時早刈可減少田間損失。
2. 長期可以貯藏，品質不會變壞，或發酸。
3. 種子生命力可以長期保存。
4. 對生產加工作業有利。
5. 增加產品之經濟價值。
6. 可以化廢物成有利之副產品。

### 乾燥原理

乾燥是一種加熱及質量移動過程，包括蒸發水分，水蒸氣與乾燥空氣混合，利用機械方法或外力移去混合氣體而除去水蒸氣，蒸發水分必須供給穀物熱量普通蒸發水分一磅約需 1000 Btu，此熱係由減少乾燥空氣中的體感熱、或由傳導、輻射、電煤質熱或其他方法而直接加熱穀物。

常用乾燥方法是利用空氣中所含的體感熱，對穀物加熱乾燥，可由氣體濕度圖上乾燥空氣狀態說明之

。一般乾燥過程假設係斷熱過程，乾燥空氣中所有損失之體感熱均轉變為水分蒸發潛熱，參與作用乾燥過程之乾燥空氣，其總熱量並無增加或減少，全無變化發生。因此乾燥空氣狀態點在濕度圖上沿一定濕球溫度向飽和曲線移動。

假如空氣與穀物接觸時間充分，達到平衡，空氣

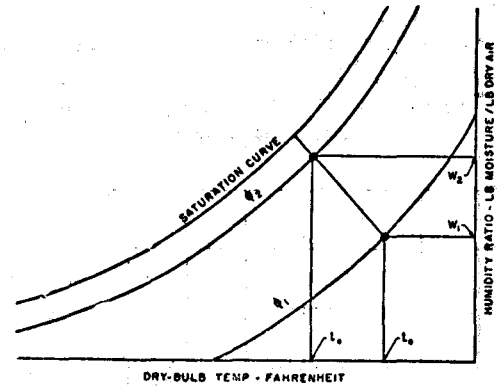


圖 (17) 乾燥過程中空氣斷熱濕化

中水蒸氣分壓力與穀物表面所產生之水蒸氣分壓力相等，不再有水分移動傳送勢能的存在，不會有乾燥或吸濕現象發生。此時空氣中相對濕度稱之為平衡相對濕度，對應的穀物水分含量稱之為平衡水分含量。相對濕度與穀物平衡水分含量之關係，各種溫度下依各種穀物而定，如圖。

據 Henderson 平衡公式係居 BET 原理及毛細管凝結原理之間為

$$1 - \phi = e^{-CTM^n}$$

式中：

$\phi$  = 相對濕度，P/P。以小數表示

e = 2.71828 自然對數基數

T 絕對溫度，°F + 460 Rankine degree

M<sub>e</sub> = 平衡水分含量%，乾重基準

n, c = 實驗常數，見附表

Some Farm Crops

Material	c	n
Cotton	$4.91 \times 10^{-5}$	1.70
Flaxseed	$6.89 \times 10^{-6}$	2.02
Shelled Corn	$1.10 \times 10^{-5}$	1.90
Sorghum	$3.40 \times 10^{-6}$	2.31
Soybean	$3.20 \times 10^{-5}$	1.52
Wheat	$5.59 \times 10^{-7}$	3.03

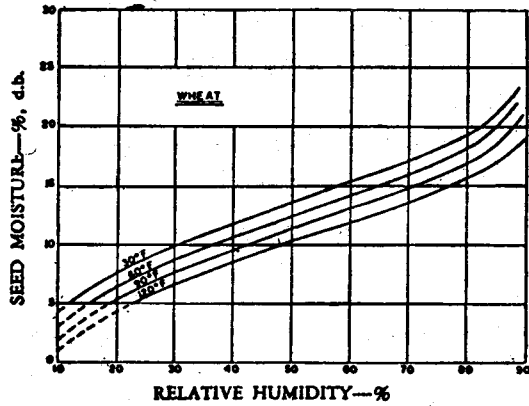
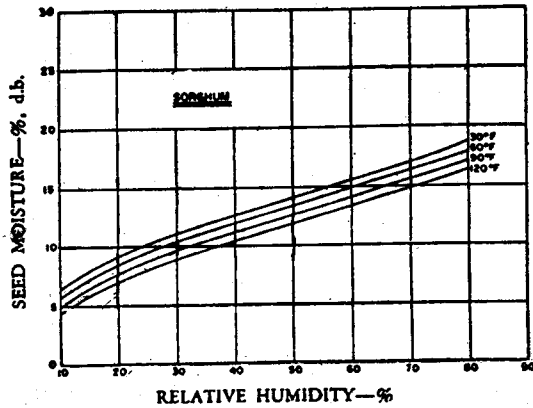
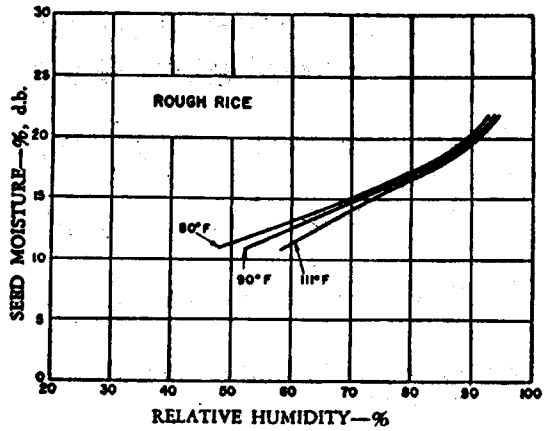
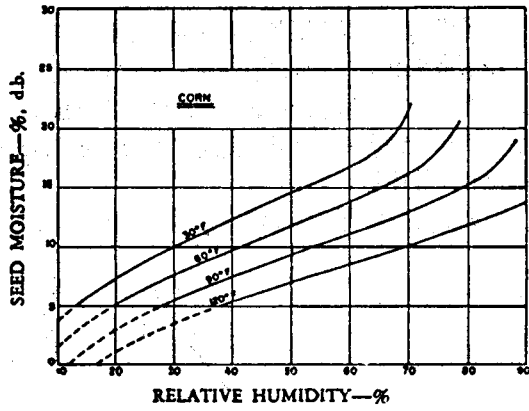


圖 (18-a) 各種穀物水分含量與相對濕度

圖 (18b) 數種常見穀物之平衡水分含量

乾燥空氣溫度  $t_0$ ，相對濕度為  $\phi_1$ ，用來乾燥穀物達到平衡時之相對濕度  $\phi_2$ ，排出空氣溫度為  $t_1$ ，乾燥空氣每磅吸受水分等於濕度含率差  $W_2 - W_1$ ，不能表示排氣之狀態，穀物與空氣接觸時間如未能充分作用，尚未達到平衡，於此狀態下無法表示穀物之乾燥率。

據 Posnov 平衡公式為

$$\frac{1}{M_s} = \frac{1}{M_{m,x}} + B \log \phi$$

式中：

$M_s$  = 平衡水分含量

$M_m$  = 最大吸濕水分含量，與絕對溫度成正比。

$B$  = 依溫度而定之係數

$\phi$  = 相對濕度，有效範圍為 0.1—1.0

據 Franchuk 平衡公式為

$$\phi = \sqrt{AW_s - B}$$

式中：

$\phi$  = 相對濕度

$W_s$  = 平衡水分含量

$A, B$  = 物體的溫度係數及孔隙率係數

又 Franchuk 之簡易平衡公式為

$$W_s = \frac{a\phi}{b - \phi}$$

式中：

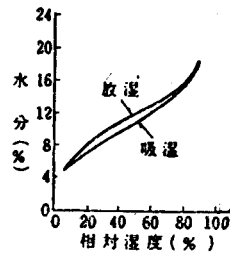
$a, b$  = 物體溫度係數及孔隙率係數

穀物體內水分可分為自由水，結合水及結晶水，附着粒子表面及孔隙中存在者為自由水，粒子內部密接者為結合水而化學結合者為結晶水。熱風、低壓下容易除去自由水及部份結合水，剩餘水分稱之為平衡水分。可以乾燥除去的水分為自由水分。

穀物常溫 25°C 左右，相對濕度 10—80% 空氣中放置，水分含量達到平衡狀態，需時數週。穀物完全乾燥水分含量等於零時，長期放置空氣中，由大氣中吸濕增加水分含量終達平衡水分含量，吾人應有防濕方法，方可保持穀物乾後品質。

相同溫度及相對濕度中穀物吸濕及除濕平衡曲線不同，有履歷現象 (Hysteresis)，依穀物種類及品種而不同。有人稱加熱乾燥改變了穀物吸濕性能，有人稱穀物為多孔物質 (porous materials) 體內窄長毛細管常與較大空隙相連，原先充塞其中或所含水分，乾燥時水分蒸發，形成空管空泡，原先水分或未完全蒸發，但至少已破壞了毛細管原先功能，穀物一旦乾燥再為吸濕，體內水分已無法達到原先充滿而均勻分布之狀態，吸濕平衡水分含量較乾燥除濕平衡水分為低。筆者認為履歷現象發生之原因以上各說皆不完全，似與鋼加熱時變態點溫度較冷卻時變態點溫度為高現象相同，因為惰性作用及質量效果影響所致。(inertia and mass effect)

吸濕 (sorption) 與除濕 (desorption) 平衡曲線不能吻合，互相重合一起，兩端點 ( $\phi = 0.0$  及  $\phi = 1.0$ ) 相連，曲線呈 S 型，最大偏差區域在  $\phi = 0.3$  與  $\phi = 0.8$  之間。圖 (19) (渡邊) 糙米之水分含量與平衡相對濕度關係。同溫度下穀物吸濕曲線原始部份 (低水分含量端) 其曲線弧度凸向水分含量縱坐標 (或曲線中心偏向相對濕度坐標)，在相對濕度  $\phi = 0.0$  與  $\phi = 0.1$  區域，穀物為單層分子吸濕之水分含量，吸濕同時有熱發生。在相對濕度  $\phi = 0.1$  與  $\phi = 0.9$  區域間，吸濕曲線弧從凸向乾燥空氣相對濕度橫坐標 (或曲線中心偏向水分含量坐標)，為多層分子吸濕之水分含量，吸濕時放熱不多。在相對濕度  $\phi = 0.9$  與  $\phi = 1.0$  區域間，吸濕時無熱產生。 $\phi$  接近  $\phi = 1.0$  時吸濕曲線此段近乎直線。平衡水分含量隨溫度增加而顯著降低。



圖(19) 糙米之平衡水分含量

於某些狀態下之溫度及濕度之乾燥空氣對某水分含量及深度之穀物進行乾燥。乾燥率 (drying rate) 表示方法如下：

任何時間內水分移去率可以簡單公式求出

$$R = \frac{CT_a}{1,000}$$

式中：

R = 由乾燥空氣中體感熱 (sensible heat) 所蒸發之水分，lb/hr

C = 乾燥系統通過空氣流量，Cfm

T<sub>a</sub> = 穀物下降溫度，°F

\* 適用於正常乾燥溫度

據 Hukill 之穀物乾燥分析方法：——粒狀吸濕物質如穀物之乾燥率  $\frac{dM}{dt}$ ，穀物水分移送入空氣，或空氣水分為穀物吸受，可以公式表示

$$\frac{dM}{dt} = -C(p_g - p_a)$$

式中：

C = 常數，為穀物及其周圍空氣膜之水蒸氣傳導率， $c = a + bv^n$  (a, b, n = 實驗常數，v = 空氣質量流率，lb/sec-sq.ft)

p<sub>g</sub> = 穀物水蒸氣分壓力

p<sub>a</sub> = 乾燥空氣中水蒸氣分壓力

當 p<sub>g</sub> > p<sub>a</sub> 進行乾燥，p<sub>g</sub> = p<sub>a</sub> 水分達到平衡，無水分移動，p<sub>g</sub> < p<sub>a</sub> 穀物受濕 (wetting)。

若水蒸氣壓力與平衡相對濕度之關係為直線關係，推理及於乾燥範圍內平衡相對濕度與水分含量之關係，上式可寫成

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_E)$$

式中：

M = 時間 t 穀物水分含量

M<sub>E</sub> = 乾燥空氣條件下，穀物之平衡水分含量，乾重基準。

k = 常數，依穀物而不同。

上式解為

$$\frac{M - M_E}{M_0 - M_E} = e^{-kt} \dots \dots \dots (A)$$

式中：

M<sub>0</sub> = 時間 t = 0，穀物水分含量 (乾重基準)

(A) 式假設條件是充分供給乾燥空氣通過淺層穀物 (Thin layer)，乾燥空氣吸受水分並不影響其蒸氣壓力，同時認為空氣速度亦不影響乾燥率，又不計乾燥過程中穀物溫度變化之影響。事實上範圍很廣之空氣速度對乾燥並非全無影響，對淺層穀物乾燥可以不計。

$$k = \alpha p_a^n V^n$$

式中：

α = 乾燥指標，1/hr

V = 空氣流動率，cu. ft/min-sq. ft.

p<sub>a</sub> = 乾燥空氣溫度下之飽和水蒸氣壓力，psi

n = 常數，一般採用 1，據 Theompson

$$n=0.8$$

$m$  = 常數， $m=0.6$  時穀物體內水分移動阻力。 $m$  幾等於零，此時乾燥阻力為體表面阻力。 $m$  值小時，則表示體內水分阻力大，且為控制乾燥速度之主要因素。

乾燥過程實與公認之自然生長及衰退現象定律相似即

$$\frac{dM}{dt} = kM$$

當  $k > 0$  時，即是自然生長定律 (The law of natural growth)

又  $k < 0$  時，即是自然衰退定律 (The law of natural decay)

穀物乾燥簡明公式

$$\frac{dM}{dt} = -kM \dots \dots \dots (B)$$

式中：

$k$  = 乾燥係數，

$$k = 0.20 \left[ \frac{T}{165} \right]^4 \left[ \frac{V}{600} \right]^{1.2} \left[ \frac{100-H}{60} \right]$$

$T$  = 乾燥空氣溫度，°F

$V$  = 乾燥空氣速度，fpm

$H$  = 乾燥空氣相對濕度，% × 100

$$H < 40\% \text{ 時，} \frac{100-H}{60} = 1$$

(B) 式解為

$$\frac{M}{M_0} = e^{-kt}$$

式中：

$M$  = 時間  $t$ ，穀物水分含量 (d. b.)

$M_0$  = 時間  $t=0$ ，穀物水分含量 (d. b.)

以上公式不適用於深層 (deep layer) 穀物乾燥，乾燥空氣狀態發生變化，並不需要完全與穀物水分含量達到平衡狀態為準。有些研究者利用淺層乾燥原理，應用電子計算機數值分析 (numerical method) 可迅速求出各層乾燥速度，水分含量，乾燥溫度及所需時間。

又 Hukill 對深層穀物乾燥分析假設熱平衡公式為

$$\frac{dq}{dt} C_p (T_0 - T_R) = M_0 - M_R \frac{dw}{dt} L$$

式中：

$\frac{dq}{dt}$  = 乾燥空氣質量流率，lb/hr

$C_p$  = 空氣比熱，Btu/lb-°F

$T_0$  = 乾燥空氣原始溫度，°F

$T_R$  = 乾燥空氣與穀物水分含量達平衡排出時之溫度，°F

$\frac{dw}{dt}$  = 空氣供給達到平衡狀態時，穀物乾燥率，lb/hr. (乾重)

$L$  = 穀物中水分蒸發潛熱，Btu/lb

據 Hukill (1954) 用無次元式表示穀物的水分，時間及深度之關係為

$$MR = \frac{2^p}{2^p + 2^y - 1} \dots \dots \dots (C)$$

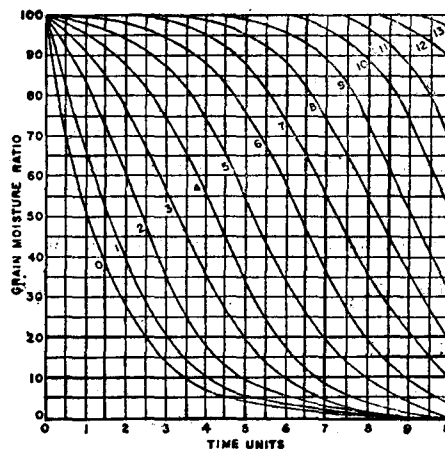
式中：

$MR = \frac{M - M_R}{M_0 - M_R}$  = 水分含量比值 (超過平衡水分含量之百分比)

$Y = \frac{\text{時間} \times k \text{ (1/hr)}}{0.693}$  = 無次元時間單位數

$D = \frac{(\text{貯槽穀物重量 lb}) \times k}{\frac{dw}{dt} \times 0.693}$  = 無次元深度單位數

根據 (A) 式計算可以繪出穀物乾燥時間，水分含量與深度之關係圖。適用於許多乾燥情形，對於已知水分含量用  $M_0$  代表，因之  $MR = 1.0$ ，及  $M_R$  為原點，時間單位換算為小時，深度單位為呎，或體積 (蒲式耳)，可由總深度或體積與總深度單位之關係。某一乾燥系統的深度單位可以有任何數值，深度曲線 0-9 可以表示各層深度中穀物水分含量對時間變化之關係。乾燥進行期中，許多低層深度單位，乾燥已達平衡狀態，乾燥層繼續經過各層向空氣流動方向前進。理論上乾燥層可能較實際穀槽深度為大。



圖(20) 穀物水分含量，深度及乾燥時間之關係 (計算值)

深層乾燥分析，常依 k 值而定，各種穀物 k 值變化大，即使同種之穀物有時也不相同，理論上並未注意 k 值亦隨穀物水分含量而不同。k 值概與各溫度之飽和水蒸氣壓力成比例，此僅為推論原則，事實上穀物應依實驗測定 k 值。Rodriguez, et al (1956) 曾測脫粒玉米 k 值如下

溫度 °F	相對濕度 %	k, 1/hr	水分含量 (%) (d.b. 實田範圍)
40	14	0.0750	26.96—24.76
		0.0315	24.76—20.50
		0.0160	20.50—16.25
		0.0075	16.25—
40	60	0.0622	27.01—25.20
		0.0325	25.20—20.20
60	76	0.0583	27.20—25.20
		0.0396	25.20—20.50
		0.0291	20.50—
100	50	0.1047	23.50—18.00
		0.0424	18.00—13.00
		0.0143	13.00—
140	11.2	0.3380	47.00—19.00
		0.1490	19.00—11.50
		0.0503	11.50—7.30
		0.0184	7.30—5.90
140	55	0.2710	43.60—13.00
		0.1390	13.00—10.40
		0.0740	10.40—9.70
		0.0520	9.70

穀物水分含量低於15% (濕重基準 w. b.)，水分蒸發潛熱比較自由水分蒸發潛熱為多，可能由於水分含量低下具有較高結合能，增加熱量不足10%。

據 Baughman, et al (1970) 研究 Hukill 之深層穀物乾燥公式，提供缺少關係式，而解答 Hukill 之公式並校正 (C) 式為

$$MR = \frac{e^D}{e^D + e^T - 1} \dots \dots \dots (D)$$

據 Barre, et al (1971) 計算水份含量與時間關係，溫度與時間關係以及各種不同深度穀物平均水分含量與時間關係如圖 (21-23)，實驗值與計算值，除了初期乾燥狀態不安定時發生偏差外，非常接近如圖 (24-25)。

一般乾燥開始後，不能立達平衡狀態 (The

quasi-stationary regime)，但經過一定時間則可達成。

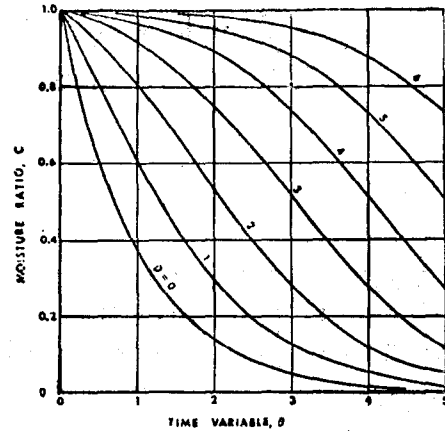


圖 (21) 穀物水分含量與時間關係

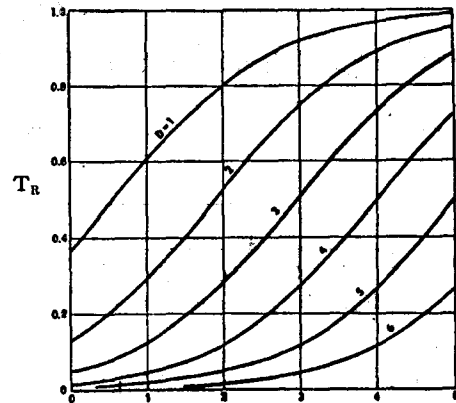
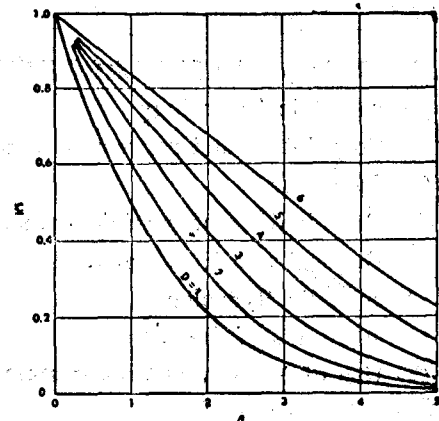


圖 (21) 穀物溫度與時間關係



Mean moisture ratio versus time

圖 (23) 穀物平均水分含量與時間關係

—文轉 48 頁—