

穀倉機械化作業之研究

IV. 機械強制通風倉庫穀層風壓及風速分佈之模擬

Study on the Mechanization of Grain Storage System

IV. Simulation Model for the Air Pressure Patterns and Flow Paths in a Paddy Warehouse Using Forced Aeration.

國立臺灣大學農業機械工程學系副教授

盧 福 明

Fu-Ming Lu

摘 要

本研究為探討強制式通風穀倉之風壓及風速之分佈情形。比較模擬值與農會穀倉之實測值之結果，指出其誤差甚小。該風壓及風速數學模式具有應用價值。

Summary

The finite difference approach was used to solve a set of partial differential equations to predict air static pressure and air flow in a paddy storage warehouse subject to forced aeration. There is good agreement between predicted and measured air static pressures. The stagnant and low velocity zones occurred in the lower corners of the warehouse and locations between adjacent ducts.

一、前 言

穀物貯存期間，用以判斷穀物品質之指標，有穀物溫度、含水率、脂肪酸度、發芽率、和真菌數目等。其中以溫度與含水率為最主要且易以測定之指標。因此一般倉貯管理作業即以維持或控制穀物溫度與含水率於安全限度以內為主要目標之一。穀物進倉貯存之前必須先行乾燥到較低含水率。臺灣各地農會收購貯藏之稻穀含水率必須低於13%。一般而言，穀物於收穫時，其含水率約20~25%，必須乾燥到13~14%含水率才可進倉貯存。穀物含水率在13%以下時，微生物及蜘蛛停止生長，含水率在10%以下，蟲害絕跡。穀物會因季節性氣候變化，改變其平衡含水率而進行緩慢的去濕或回潮反應。

大氣溫度會影響貯藏期間穀溫變化。以稻穀倉

庫為例，其穀溫的變化受到季節性氣溫變化的影響甚為明顯^(1,2)。穀溫一旦升高，微生物活動即增強，經由呼吸作用產生的熱量更促使穀溫居高不下。如不及時排除穀層間聚積的熱量以降低穀溫，其結果將導致貯穀品質劣化。據一般倉貯經驗得知，降低穀溫4°C所增加的安全貯存期限相當於降低穀物含水率1%所獲致的貯存效果⁽³⁾。

排除穀層熱氣的方法，可採用翻倉方式，即搬運整倉穀物到另一空倉內，以破除穀層高溫熱點。翻倉方法耗費工時甚多，較不經濟。另一控制穀溫方法為自然對流通風和強制通風方式。

自然對流通風方式為利用熱氣上升對流現象排除穀倉積熱，穀物降溫速率緩慢。臺灣各地農會舊有散裝穀倉內大都垂直放置竹筴通風筒於穀倉地板上或風溝出風口上方。竹筴筒直徑0.2~0.3 m，長5 m，穀倉內每隔2~3 m距離垂直插放一支竹

篾筒。穀層熱氣經由竹篾筒網孔間隙向上移動到穀倉表面，再排出穀倉。

強制通風方式為藉著通風機，將外界空氣經由穀倉底部風溝吹送進入穀倉，迫使空氣經由底層穀物快速流向上層穀物，而將穀層間的熱氣帶出倉外，達到快速降低穀溫的效果。通風機不但要具備足夠風量，也須具有足夠風壓以克服通風時氣流通過穀層所遭受到的阻力。穀倉通風時，穀層對氣流之阻力經 Shedd⁽⁴⁾ 於 1953 年提出試驗報告之後，有關各類穀物之通風阻力散見於研究報告及書籍^(5,6,7,8,9)。穀倉通風量 (CMM) 一般為每公噸穀物每分鐘 0.05~0.2 立方公尺空氣量。小穀粒，雜夾物，深穀層與高風速都會增加通風阻力。

通風時，應注意穀倉內風壓或風速分佈狀況，必須避免產生風速停滯區以免造成通風降溫效果不均勻的現象。通風時，氣流最易由阻力最弱的地方移動。因之通風溝的個數與排列情形，穀層表面與各個風溝的距離，和穀層密度等都會影響通風作業之風壓及風速分佈情形。不均勻的風壓及風速分佈狀況將導致穀倉通風降溫效果之不均勻性。即通風後部份穀物已降低溫度，而另一部份穀物溫度仍居高不下，或僅些微下降。

本研究目的為模擬分析穀倉通風時之穀層風壓及風速分佈情形，以探究風速停滯區的分佈範圍，以供穀倉通風設計及操作之參考。

二、穀層風壓及風速之理論分析

穀倉內之穀物層為一含孔隙的物料。流體通過均質孔隙物料時，單位距離或深度 ΔL 的壓力降 ΔP 與流速或流量 V 的關係可用下列二式表示之⁽¹⁰⁾。式中 a, b, n 為常數。

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = aV + bV^n \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = aV^n \dots\dots\dots(2)$$

探討穀層風壓或風速分佈情形，一般以數值分析法配合電子計算機運算求之。一般假設為穀層為均質性，風速之方向垂直於穀層風壓等壓線，風速與風壓具有函數關係，例如公式(1)或公式(2)。

以下說明乃強制式通風倉穀層風壓和風速之二次元分析。假設在 X 和 Y 方向之風速 V_x 和 V_y 可用流體連續公式表示之，如公式(3)

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots(3)$$

公式(3)可改寫成向量公式(4)

$$\nabla \cdot \bar{V} = 0 \dots\dots\dots(4)$$

另一假設為壓力梯度之向量與風速向量之關係如下式⁽¹¹⁾。

$$\nabla P = -f(|\bar{V}|) \frac{\bar{V}}{|\bar{V}|} \dots\dots\dots(5)$$

公式(5)中之 $f(|\bar{V}|)$ 可用類似於公式(2)之公式(6)表示之。

$$f(|\bar{V}|) = A|\bar{V}|^n \dots\dots\dots(6)$$

公式(6)中， A, n 為常數。由公式(3)、(4)、(5)和(6)可得下式。其詳細請參看筆者已發表著作⁽¹¹⁾。

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j \right) \cdot \left\{ \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1-n}{2n}} \left(\frac{\partial P}{\partial x} i + \frac{\partial P}{\partial y} j \right) \right\} = 0 \dots\dots\dots(7)$$

展開公式(7)即得 Brooker 公式⁽¹²⁾ 如下式。式中 $m = (n-1)/2n$ 。

$$\left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)^2 \right] \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) - 2m \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^3 + \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} \frac{\partial P}{\partial x} + \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)^3 + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \frac{\partial P}{\partial x} \right] = 0 \dots\dots\dots(8)$$

運用數值法，解公式(8)之非線性偏微分方程式，取 $\Delta x = \Delta y = h > 0$ ，可求得穀層各點風壓如下式。

$$P(x,y) = \frac{1}{4(1-m)} \left[P_{x,x} + P_{y,y} - \frac{m(2P_{xx}^2 P_{xx} + P_{xx} P_{yy} P_{yy} + 2P_{xy}^2 P_{xy})}{P_{xx}^2 + P_{yy}^2} \right] \dots\dots\dots(9)$$

公式(9)中

$$\begin{aligned} P_{x,x} &= P(x,y-h) + P(x,y+h) \\ P_{y,y} &= P(x-h,y) + P(x+h,y) \\ P_{xx} &= P(x,y-h) - P(x,y+h) \\ P_{yy} &= P(x-h,y) - P(x+h,y) \\ P_{xy,xy} &= P(x+h,y+h) + P(x-h,y-h) - P(x+h,y-h) - P(x-h,y+h) \end{aligned}$$

穀層風速於X和Y方向之分速度可由下列二式求之。

$$V_x = -A^{-\frac{1}{n}} \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1-n}{2n}} \frac{\partial P}{\partial x} \quad \dots(10)$$

$$V_y = -A^{-\frac{1}{n}} \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1-n}{2n}} \frac{\partial P}{\partial y} \quad \dots(11)$$

求解公式(8)之邊界條件為穀層表面與底板之風壓梯度 $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$ ，垂直倉壁之風壓梯度 $\frac{\partial P}{\partial x} = 0$ 。初始條件為穀層各點風壓梯度 $\frac{\partial P}{\partial x} = 0, \frac{\partial P}{\partial y} = 0$ 。位於風溝正上方之風壓等於通風機風壓。

三、穀層風壓及風速分佈之模擬結果與討論

筆者依據新竹縣新豐鄉農會松柏林倉庫第14號鋼筋水泥強制式通風倉模擬穀層風壓及風速分佈狀況。該模擬倉長29公尺寬11.6公尺，共100坪，貯穀高6公尺。該倉地面下設有三條通風溝，各配備有7.5馬力通風機，靜壓70mm水柱(686 Pascal)，風量100 CMM。模擬倉斷面如圖1。通風時穀層風壓的量測方法為將6.35mm口徑鋼管插入穀層，鋼管底端密封並鑽有12個1.2mm口徑圓洞。鋼管上端套有強力橡膠管連接到傾斜壓力計(Airflow Development, Model 5, 精確度0.1mm水柱)。風壓量測位置如圖1之F, J, K, L, M, N和P點。各測點距離風機約14公尺。

1. 模式印證

在理想條件之下，即均質穀層，且三條風溝風壓相等。即無漏氣時，穀倉風壓及風速之模擬結果如同圖2和圖3。穀倉三個風溝風壓各為1000 Pascal。模擬結果指出各風溝之間和穀倉左右兩角落屬於低風速區。中上層風速分佈(包括方向及大小)較為均勻。在圖3，穀層表面之總空氣流量為0.5186 m³/s (0.0451m/s×11.5m×1m)。穀倉最底層之垂直分速度之平均值為0.0438m/s。據此計算由穀倉最底層往上移動之空氣量為0.5037

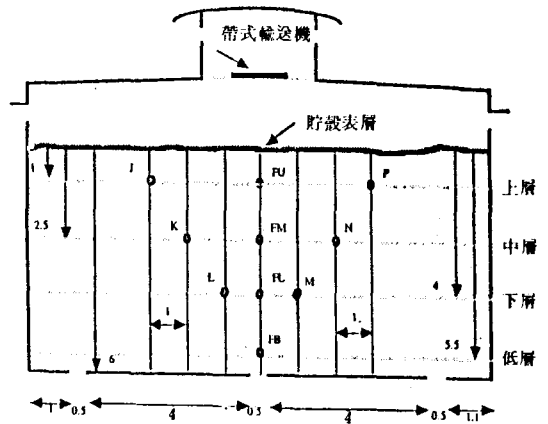


圖1. 新竹縣新豐鄉農會松柏林倉庫第14號稻穀倉庫斷面圖及穀層風壓量測點。(倉底設有左, 中, 和右端三個通風溝。圖上標示距離單位為公尺。該倉共貯有稻穀1123公噸)

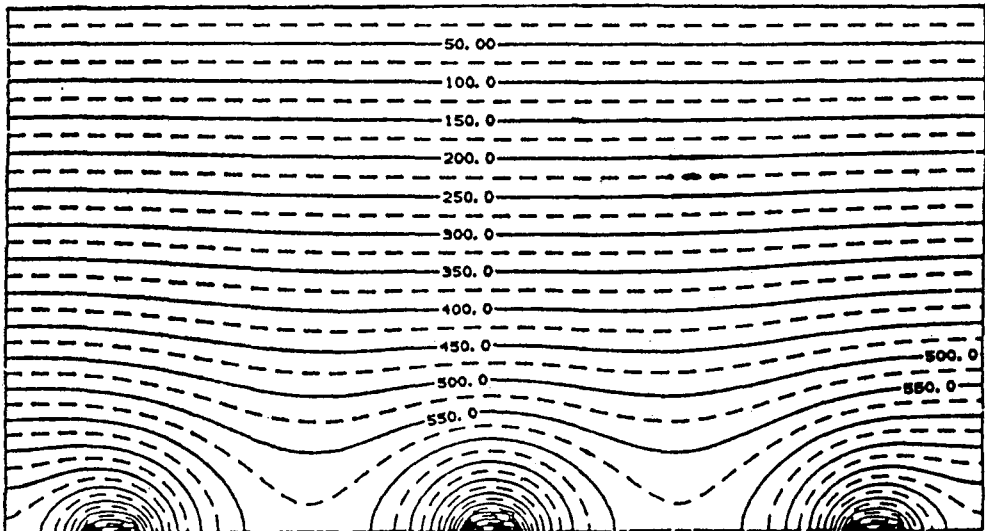


圖2. 模擬穀倉風壓分佈(理想狀態)。三條風溝之風壓各為1000 Pascal.

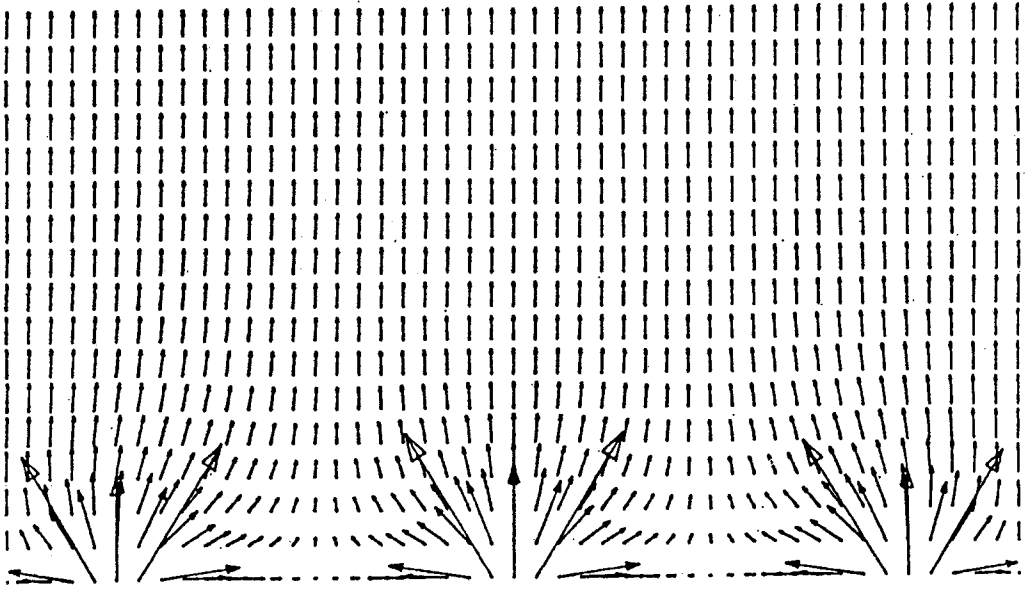


圖3. 模擬穀倉風速分佈(理想狀態)。三條風溝之風壓各為 1000 Pascal.

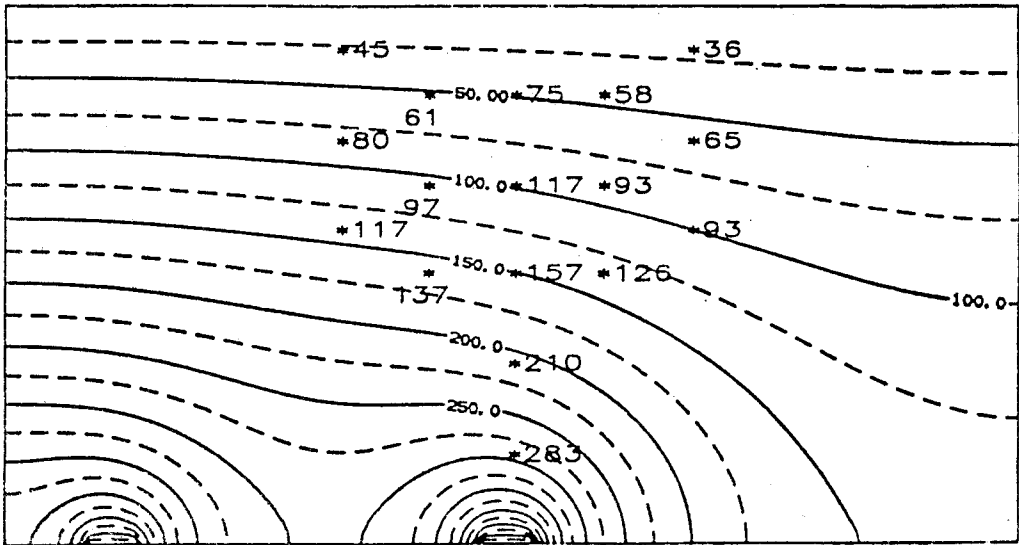


圖4. 實際模擬穀倉風壓之等壓線及實測值(星號)。

風溝風壓：左=550，中=550，右=150 Pascal.

$m^3/s(0.0438m/s \times 11.5m \times 1m)$ 。穀倉最上層與最底層之空氣流量相差甚小，約3%。此結果顯示根據公式(8)所做的模擬結果極為準確。

圖3，也顯示出平行氣流的範圍約在風溝上方 $D=2.5$ 公尺以上的穀層，而兩風溝之距離 $w=4.5$ 公尺，因此產生平行氣流的穀層位置，其 $D/W=0.56$ ，此一事實符合 Ives 等人之結論⁽¹³⁾。即在穀層產生平行氣流的位置為 D/W 大於或等於0.5

。因之，由平行氣流的產生範圍也可印證模擬結果之準確性。

實際現場操作強制通風作業，因模擬倉最右邊風溝在靠近風機的一段沒堆滿稻穀而有漏氣現象。因之強制通風時，圖1風溝風壓自左到右各為 550，550，和 150 Pascal。風壓分佈模擬結果及實測值如圖4。因最右邊風溝壓力小，因之風向有向穀倉右側移動的趨勢，其風速分佈情形如圖5。由圖

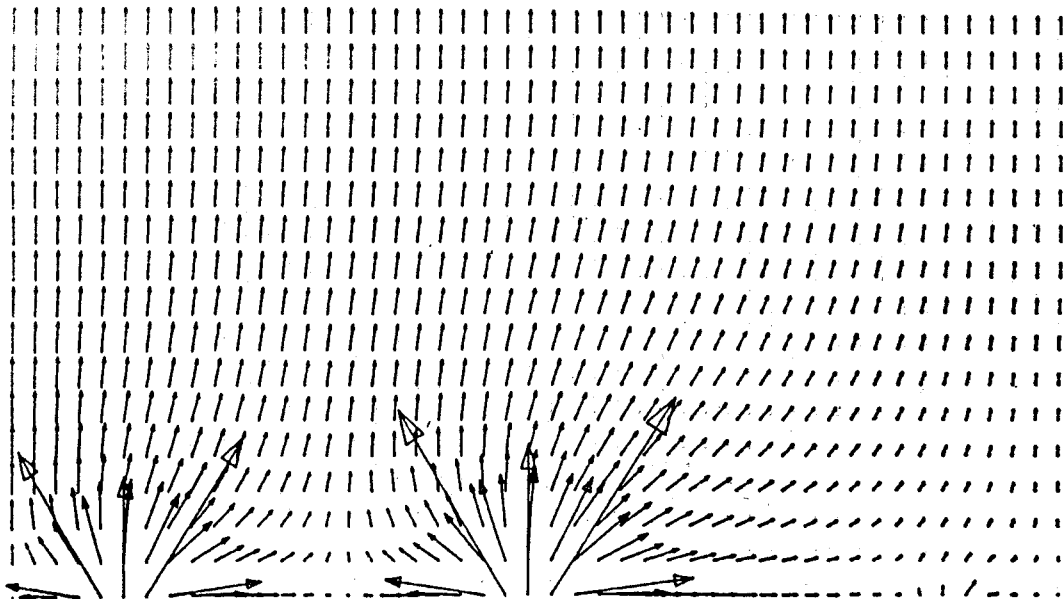


圖 5. 實際模擬穀倉風速分佈。風溝風壓：左=550，中=550，右=150 Pascals.

5 可看出穀倉最右側之風速低，因之位於右側的稻穀之通風降溫果較差。

由圖 1 各風壓量測點所測得之風壓值與模擬估計風壓值之相關性如圖 6，其相關係數 $R=0.96$ 也顯示使用模擬法之準確性。

2. 模式應用

應用模式可預測各種通風條件下之風壓及風速分佈情況，事先找出降溫最慢之區域，供設計或修改穀倉通風設備之參考。底下為以圖 1 穀倉為例探討三個風溝在不同風壓條件，穀層風速之分佈情形。圖 7 為左右兩風溝之風壓各為 550 Pascal，而中間風溝風壓為零。因此於通風時氣流會直接由中間風溝漏出倉外。圖 8 為左邊風溝之風壓為 550 Pascal，其他風溝風壓為零，通風後部份氣流即由中間及右側風溝漏出倉外。

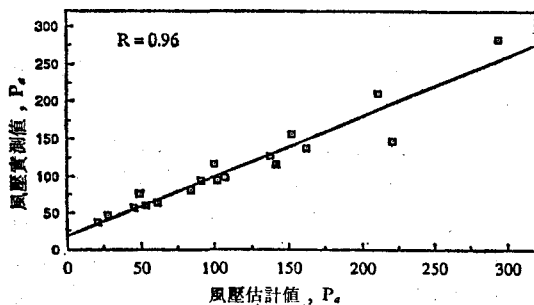


圖 6. 風壓之估計值與實測值之相關性

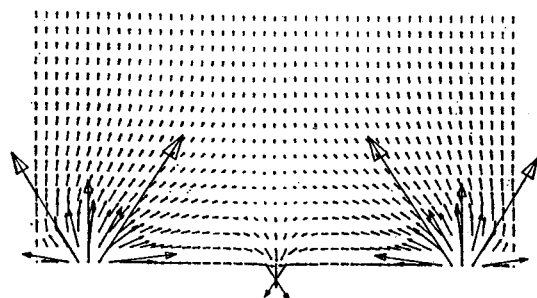


圖 7. 模擬穀倉風速分佈

風溝風壓：左=550，中=0，右=550 Pascal.

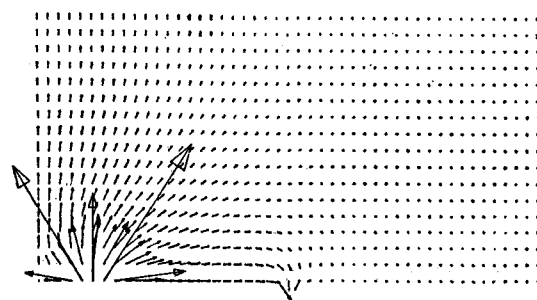


圖 8. 模擬穀倉風速分佈

風溝風壓：左=550，中=0，右=0 Pascal.

圖 9 與圖 10 顯示氣流由風壓為零之風溝漏出倉外。Miketinac⁽¹⁴⁾ 等人應用套裝有限元素程式，解公式(8)，以探討不同的風溝形式影響穀層風壓及風速之分佈。其結果之一如圖 11 和圖 12，從風速分

佈圖觀之，氣流停滯區或低速區也位於穀倉左右兩個角落。圖11和圖12代表穀倉只具單一風管的情況。位於穀倉中上層之風速分佈較為均勻。其模擬結果與本研究應用微差分法之結果略似。

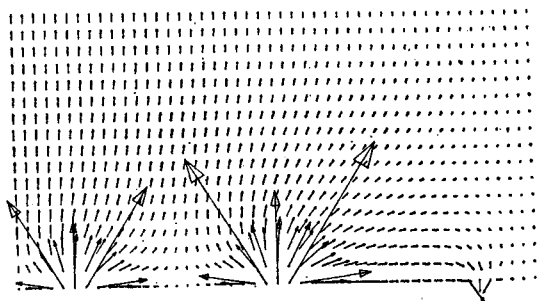


圖9. 模擬穀倉風速分佈

風溝風壓：左=550，中=550，右=0 Pascal.

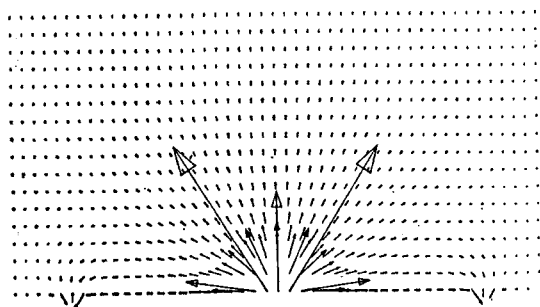


圖10. 模擬穀倉風速分佈

風溝風壓：左=0，中=550，右=0 Pascal.

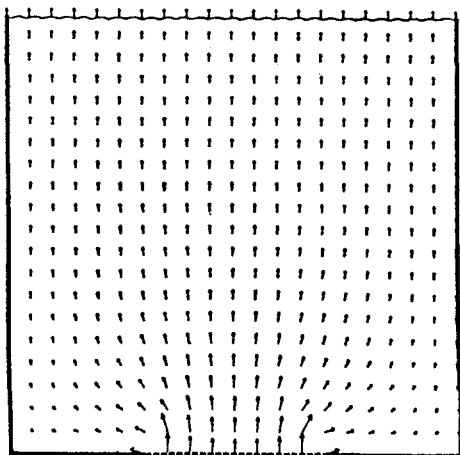


圖11. 方形穀倉風速分佈圖⁽¹⁴⁾

出風口網孔與穀倉底板等高

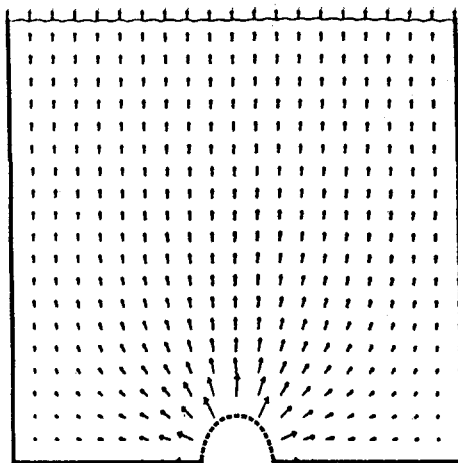


圖12. 方形穀倉風速分佈圖⁽¹⁴⁾

半圓形出風網孔凸出穀倉底板

四、結 論

本研究假設穀倉風壓及風速分佈為二次元。應用數值法模擬所得結論如下：

1. 模擬穀層風壓之估計值與實測值之誤差甚小。風壓及風速模擬公式具有實際應用之價值。
2. 通風時，氣流停滯區或低速區位於兩通風溝之間及穀倉左右兩端角落。
3. 平行流風向約發生於穀倉中間層位置以上的穀層。

五、參 考 文 獻

1. 盧福明、賈精石、侯信雄。1977。圓筒倉貯存稻穀之研究。中國農業工程學報 23(4):9-23。
2. 盧福明。1983。穀倉機械化作業之研究。II、機械強制通風方式控制貯存稻穀溫度之效果。中國農業工程學報 29(1):52-61。
3. Hall, D W. 1960. Handling and Storage of food grains in tropical and sub-tropical areas. FAO Agricultural Development Paper no. 90.
4. Shedd, C. K. 1951. Some new data on resistance of grains to airflow. Agricultural Engineering 32(9):493-495, 520.
5. Shedd, C.K. 1953. Resistance of grains and seeds to air flow. Agricultural Engineering 34(9):616-619.
6. 盧福明。1986。農產加工工程學。國立編譯館。

7. Calderwood, D. L. 1973. Resistance to airflow of rough, brown and milled rice. Transactions of ASAE 16(3):525-527, 532
8. Bowrey, R. G. and C. L. Intong. 1983. Pressure losses in ventilated paddy rice stores. Food Technology in Australia 35(2):78-79.
9. 鍾木華、蕭介宗。1987。玉米粒之密度、高度、粉塵含量及低通風量對壓力降之影響。中國農業工程學會七十六年度學術研討會田間作業及農產加工機械之研究論文集156~173頁。
10. Muskat, M. and R. D. Myckoff. 1937. The flow of homogeneous fluids through porous media. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York.
11. LU, F. M., T. Rumsey and P. Chen. 1987. Simulation model for aeration of rice in warehouses. American society of Agricultural Engineers paper no. 87-6548.
12. Brooker, D. B. 1961. Pressure pattern in grain drying systems established by numerical methods. Transaction of the ASAE 4(1):72-74, 77.
13. Ives, N. C., W. V. Hukill, and R. A. Saul. 1959. Grain ventilation and drying patterns. Transactions of the ASAE 2(1):95-101.
14. Miketinac, M. J., S. Sokhansanj and D. S. Jayas. 1986. Graphical analysis of airflow distribution in grains using the finite element method. Canadian Agricultural Engineering 28(1):23-30.

專營土木、水利、建築等工程

純 源 工 程 行

地址：台北市西藏路259巷29號 電話：(02)3074813

專營土木、水利、建築等工程

華 生 行

地址：台北市長春路86巷3弄4號 電話：(02)9684352

專營土木、水利、建築等工程

明 朝 土 木 包 工 業

地址：高雄市岡山鎮空醫路37巷11弄20號 電話：(07)6228273