

中華民國第 58 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生活與應用科學(二)科

佳作

032918

我開『窗』你納『涼』--探討不同形式溫室屋頂
與其開窗位置的降溫能力--

學校名稱：屏東縣立明正國民中學

作者： 國二 孫海軒 國二 蘇冠融 國二 陳秉燦	指導老師： 陳盈吉 鍾梅英
---	-----------------------------

關鍵詞：溫室、降溫率、伯努力定律

研究摘要

一、降溫率好壞受屋頂形狀和窗口位置有關。山形和斜頂式頂高較矮、角度大的屋頂，降溫率較好。風場分析得知對開迎風面和背風面窗口，風速較大。因屋頂角度平緩，可能有伯努力效應形成，使它降溫好。

二、圓拱型屋頂並非弧型越圓越好，頂高 16cm 頂開上下層的降溫效果好，增高或降低都會影響降溫率。

三、以小風車圈數測量屋頂上方風場變化，推測溫室氣流走向。圓拱型頂高 16cm 頂開的窗口正上方 3cm 的轉速最快，即該處有個低壓中心，容易帶走熱空氣。山形 150 度對開平均降溫率比其更好，但是下層的降溫效果不如圓拱型頂高 16cm 頂開。

四、(一) 平均降溫率最佳的三名：山形 9cm 對開 > 圓拱型 16cm 頂開 > 圓拱型 9cm 對開。

(二) 上下層降溫率最一致的是圓拱型 16cm 頂開。

壹、 研究動機

因為親戚家的田上蓋了好幾個種滿文心蘭和桔梗的溫室，當我們去參觀的時候發現，溫室內有好幾個抽風機在抽風散熱。雖然在中高緯度的地區，會利用溫室來幫植物保暖和保濕，但是在炎熱的台灣，溫室內的氣溫很高也不通風，免不了要靠抽風機散熱，特別是在夏季抽風機整天運轉，著實是耗電。所以我們幾個在網路上搜尋資料和老師討論之後，研究哪一種形式的溫室不用抽風機，就可以引『涼』入溫室。



圖 1-1 山形溫室



圖 1-2 斜頂式溫室



圖 1-3 圓拱型溫室

貳、 文獻探討

稱作溫室的暖房，是專門種植植物的建築物。它的建築材料是塑膠或玻璃，溫室受陽光加熱，使溫室內的作物、土壤、空氣等變溫暖，也有防止水份過度蒸發的好處。在台灣的田間溫室屋頂高約 3.5m~7m，多為拱形或山形。現在也有新的斜頂型的溫室。無論如何，氣溫過高時還要用抽風機或噴水霧、用水牆來散熱。

鄉間田野地區多半空曠容易有風。因此，我們想利用風和溫室出風口（窗口）產生的對流來改良可以散熱的溫室。

我們在預備實驗過程中，發現當溫室都沒有窗口的時候，不管外面有沒有風，溫室內部降溫速率極慢，甚至於不降溫。不僅窗口是開在迎風面屋頂側邊降溫很差，連在接近牆邊的位置降溫效果也不好。但是若在屋頂開天窗和屋頂 1/2 處開對窗，都發現有降溫的效果。因此我們將模擬山形、拱形、斜頂式屋頂作個小溫室，用電風扇來模擬自然風來進行研究。

參、 研究目的與問題

根據文獻探討與分析所設定研究目的與問題，如下所示：

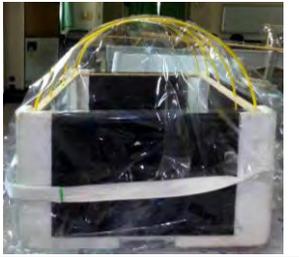
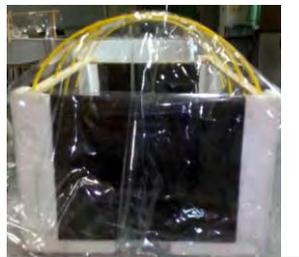
表 3-1 研究目的與問題

研究目的	研究問題
山形的溫室屋頂，若其角度或高度不同時，是否會影響其降溫效果。	1.當溫室外有風，當窗口在開在屋頂，降溫效果如何？ 2.當溫室外有風，在開在屋頂高度 1/2 處開對窗，降溫效果如何？ 3.不同的屋頂角度是否影響降溫效果。
斜頂式的溫室屋頂，若其角度或高度不同時，是否會影響其降溫效果。	1.當溫室外有風，當窗口在開在屋頂，降溫效果如何？ 2.當溫室外有風，在開在屋頂高度 1/2 處開對窗，降溫效果如何？ 3.不同的屋頂角度是否影響降溫效果。
圓拱形的溫室屋頂，若其弧度或高度不同時，是否會影響其降溫效果。	1.當溫室外有風，當窗口在開在屋頂，降溫效果如何？ 2.當溫室外有風，在開在屋頂高度 1/2 處開對窗，降溫效果如何？ 3.不同的屋頂高度是否影響降溫效果。
嘗試找出降溫效果好的溫室，探討其降溫效果佳的原因	1.溫室內部的熱空氣的流動情形為何。 2.屋頂上方的風速是否有不同。

肆、 研究架構、設備與器材

一、 研究設備與器材

數位溫度計、相機、蚊香、打火機、電風扇與下表自製實驗工具與不同角度的屋頂

山形 90 度,頂高 21cm	山形 120 度,頂高 16cm	山形 150 度,頂高 9cm	斜頂式 65 度,頂高 21cm
			
斜頂式 70 度,頂高 16cm	斜頂式 80 度,頂高 9cm	圓拱形,頂高 21cm	圓拱形,頂高 16cm
			
圓拱形,頂高 9cm	可愛小風車	包了綠色玻璃紙手電筒	測量溫室上下層的溫度
			

二、 實驗方法

1. 將數位溫度計放在上下四個角落，紀錄溫度。
2. 在溫室底部放置蚊香，點燃蚊香使溫室充滿煙並升溫 5 分鐘。5 分鐘後記錄溫室內的溫度。包了綠色玻璃紙的手電筒放至溫室內，觀察溫室內部煙流流向與分布。
3. 打開溫室屋頂的開口，以電風扇中的低速風距溫室 1m 的位置吹拂 15 分鐘。每隔 5 分鐘紀錄溫度。
4. 用小風扇測量屋頂上方 3 公分的轉數風速：使用可愛小風車，把其中一片扇葉塗上黑色，放至在定點之後使用錄影機拍攝轉動影片。使用 GOM Player 播放軟體進行慢速播放，計數固定時間內其轉動的圈數/秒數，定義為該風車轉速。

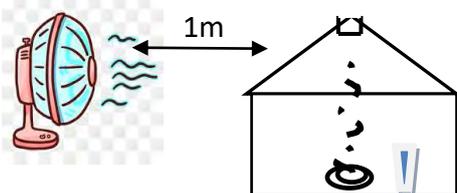


圖 4-2 實驗裝置示意圖



伍、 研究結果與分析

一、不同型態溫室屋頂，不同的開窗位置在風扇最弱風速下的降溫情形

(一)山形屋頂

表 5-1-1：山形屋頂有風有開窗的降溫情形

屋頂高度	21cm (屋頂夾角 90 度)	16cm (屋頂夾角 120 度)	9cm (屋頂夾角 150 度)
降溫變化 (對開)	<p>山形屋頂90度對開降溫情形</p>	<p>山形屋頂120度對開降溫情形</p>	<p>山形150度屋頂對開降溫情形</p>
降溫變化 (頂開)	<p>山形屋頂90度頂開降溫情形</p>	<p>山形120度屋頂頂開降溫情形</p>	<p>山形150度屋頂頂開降溫情形</p>

由表 5-1 我們發現升溫 5 分鐘後，溫室上層溫度均比下層高，推測原因是點燃的蚊香加熱空氣，使熱空氣密度變小，對流到屋頂上層，因而上層溫度較下層高。

當風扇以最弱風速吹拂時，所有的溫室上下層都開始降溫，並且 15 分鐘後，大部分的上層溫度下降幅度較大。以對開而言，90 度和 150 度上層溫度 15 分鐘後都比下層溫度低、頂開則 120 和 150 度最後上下層溫度幾乎一致。

(二)斜頂式屋頂

表 5-1-2：斜頂式屋頂有風有開窗的降溫情形

屋頂角度	21cm (屋頂夾角 65 度)	16cm (屋頂夾角 70 度)	9cm (屋頂夾角 80 度)
降溫變化 (對開)	<p>斜頂式65度對開屋頂降溫情形</p>	<p>斜頂式屋頂70度有風對開降溫情形</p>	<p>斜頂式80度對開屋頂降溫情形</p>
降溫變化 (頂開)	<p>斜頂式屋頂65度有風頂開降溫情形</p>	<p>斜頂式屋頂70度有風頂開降溫情形</p>	<p>斜頂式屋頂80度有風頂開降溫情形</p>

由表 5-2 我們也發現升溫 5 分鐘後，溫室上層溫度大部分比下層高，推測原因是點燃的蚊香加熱空氣，使熱空氣密度變小，對流到屋頂上層，因而上層溫度較下層高。

當風扇以最弱風速吹拂時，所有的溫室上下層都開始降溫。並且 15 分鐘後，上層溫度下降幅度較大。而且以對開而言，無論何種角度的屋頂上層溫度 15 分鐘後都比下層溫度低、頂開則最後上下層溫度幾乎一致。

(三)圓拱形屋頂

表 5-1-3：圓拱型屋頂有風有開窗的降溫情形

屋頂高度	21cm	16cm	9cm
降溫變化(對開)	<p>圖拱形屋頂21cm對開降溫情形</p>	<p>圖拱形屋頂16cm對開降溫情形</p>	<p>圖拱形屋頂9cm對開降溫情形</p>
降溫變化(頂開)	<p>圖拱形屋頂21cm頂開降溫情形</p>	<p>圖拱形屋頂16cm頂開降溫情形</p>	<p>圖拱形屋頂9cm頂開降溫情形</p>

由表 5-3 我們也發現升溫 5 分鐘後，溫室上層溫度大部分比下層高，推測原因是點燃的蚊香加熱空氣，使熱空氣密度變小，對流到屋頂上層，因而上層溫度較下層高。

當風扇以最弱風速吹拂時，所有的溫室上下層都開始降溫，並且 15 分鐘後，頂高 21cm 無論是對開還是頂開，上層溫度都較下層溫度低。而頂高 9cm 的圓拱型溫室上下層溫度都趨近一致。

由以上的數據顯示，屋頂的角度和弧度會影響降溫情形。這種現象引起我們的好奇，讓我們想更進一步了解降溫率是否也會所不同。因為每天的氣溫都不同，早晚也不一樣。所以我們用降溫率來進一步分析。

二、不同型態溫室屋頂，不同的開窗位置在風扇最弱風速下的降溫率

因為實驗進行時，每天的氣溫變化都不一樣。所以我們以溫室降溫率多寡來進一步比較。

(一)山形屋頂

表 5-2-1：山形屋頂有風有開窗的降溫率

山形屋頂上層	降溫時間	0分鐘	5分鐘	10分鐘	15分鐘	山形屋頂下層	降溫時間	0分鐘	5分鐘	10分鐘	15分鐘
降溫率 %	150度對開	0.00	3.66	5.23	6.27	降溫率 %	150度對開	0.00	1.99	2.79	3.85
	150度頂開	0.00	1.83	2.35	2.75		150度頂開	0.00	0.60	1.20	1.39
	120度對開	0.00	2.21	2.49	3.04		120度對開	0.00	0.30	0.60	0.60
	120度頂開	0.00	0.49	1.29	1.94		120度頂開	0.00	0.49	0.49	0.49
	90度對開	0.00	1.90	2.50	2.50		90度對開	0.00	0.00	0.30	0.30
	90度頂開	0.00	0.73	1.22	1.34		90度頂開	0.00	1.11	1.24	1.24

表 5-2-1-2：山形屋頂有風有開窗的降溫率圖

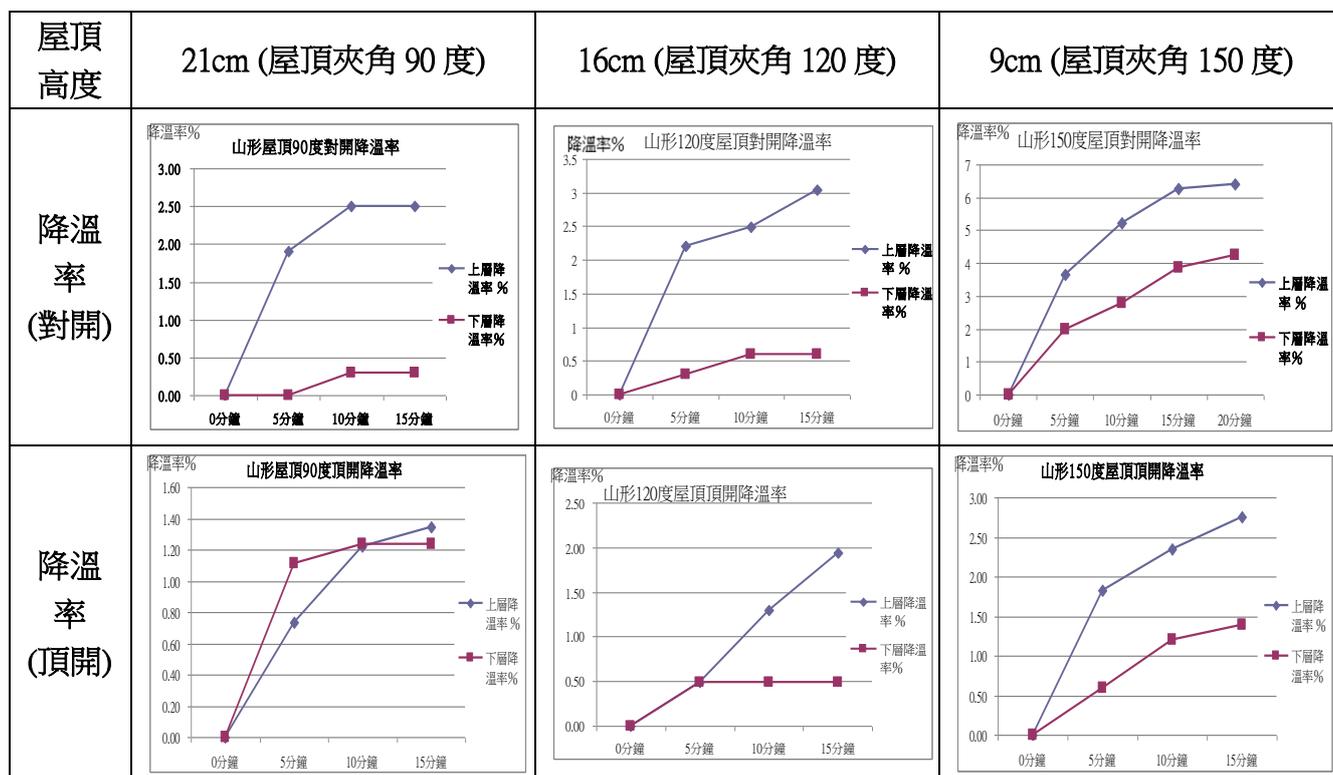
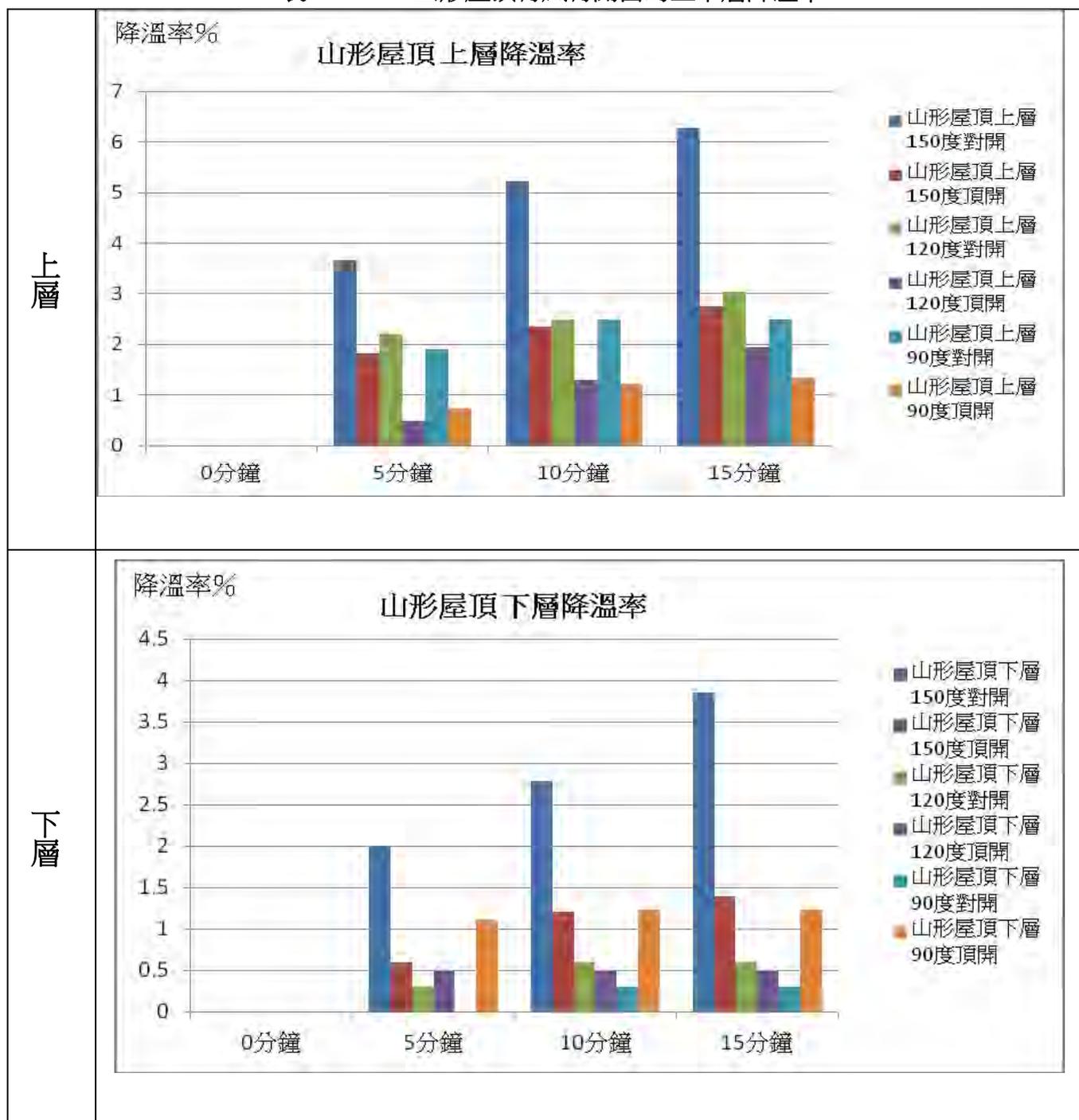


表 5-2-1-3：山形屋頂有風有開窗的上下層降溫率



由表 5-2-1-1~3 中，我們發現不管是對開還是頂開，風扇吹風時間越久降溫率越好，而且上層降溫率都比下層高。但是整體而言對開降溫率優於頂開，而且以屋頂頂高最低且角度 150 度上層的降溫率最好達 6.27%，下層的降溫率 3.85% 也優於山形其它下層的降溫率。其次是 120 度對開。

所以對於山形屋頂屋的頂高較低、屋頂角度越大，上層整體降溫率都比較好（150 度 > 120 度 > 90 度）。還有窗戶開在屋頂的位置似乎降溫效果不像開對窗來的好。下層整體降溫率 150 度優於其它角度。但是降溫率較上層低很多。

(二)斜頂式屋頂

表 5-2-2-1：斜頂式屋頂有風有開窗的降溫率

斜頂式屋 頂上層	降溫時間	0分鐘	5分鐘	10分鐘	15分鐘	斜頂式屋 頂下層	降溫時間	0分鐘	5分鐘	10分鐘	15分鐘
降溫率%	9cm 對開(80度)	0.00	1.10	1.54	1.54	降溫率%	9cm 對開(80度)	0.00	0.44	0.88	0.88
	9cm 頂開(80度)	0.00	1.86	2.30	2.41		9cm 頂開(80度)	0.00	0.77	1.43	1.65
	16cm 對開(70度)	0.00	1.08	2.97	3.24		16cm 對開(70度)	0.00	0.00	0.27	0.55
	16cm 頂開(70度)	0.00	1.33	1.86	1.86		16cm 頂開(70度)	0.00	0.00	0.27	0.54
	21cm 對開(65度)	0.00	1.10	1.38	1.38		21cm 對開(65度)	0.00	0.28	0.28	0.55
	21cm 頂開(65度)	0.00	0.80	1.88	1.88		21cm 頂開(65度)	0.00	0.00	0.27	0.27

表 5-2-2-2：斜頂式屋頂有風有開窗的降溫率圖

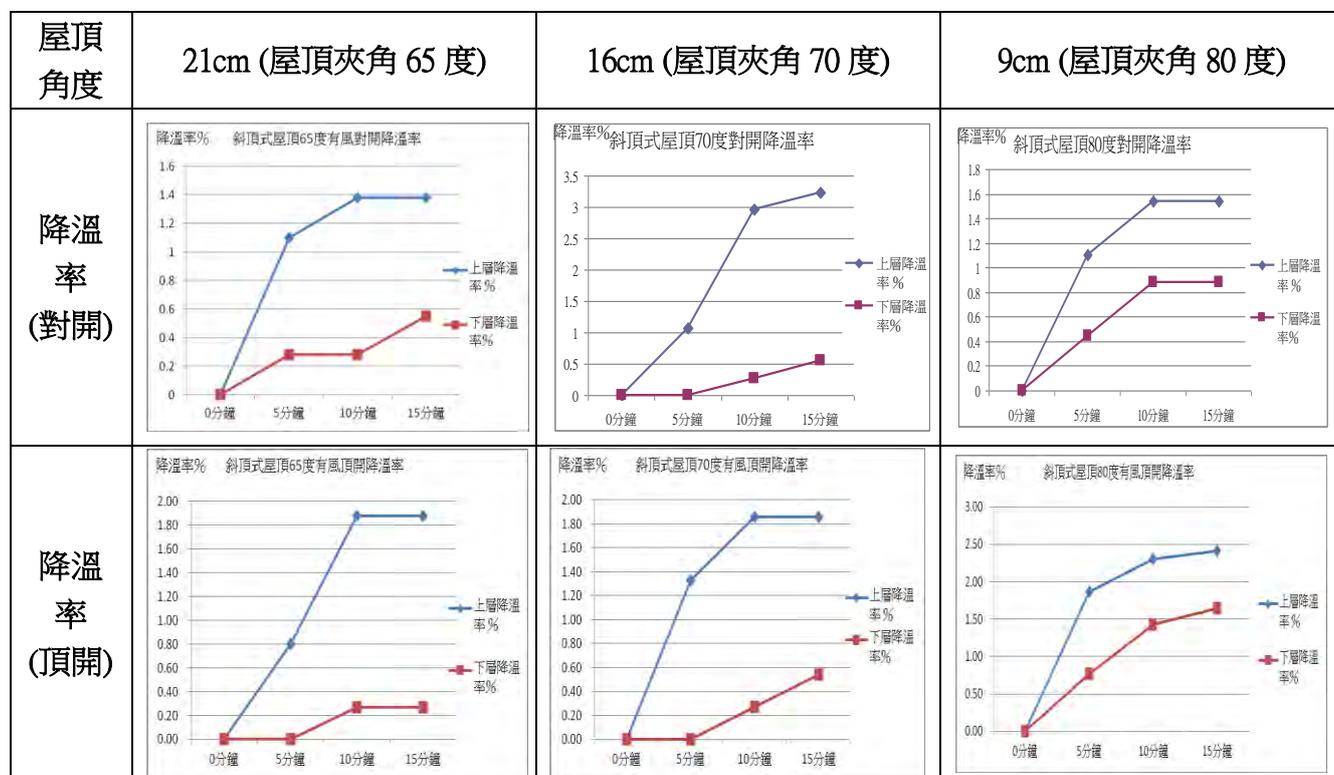
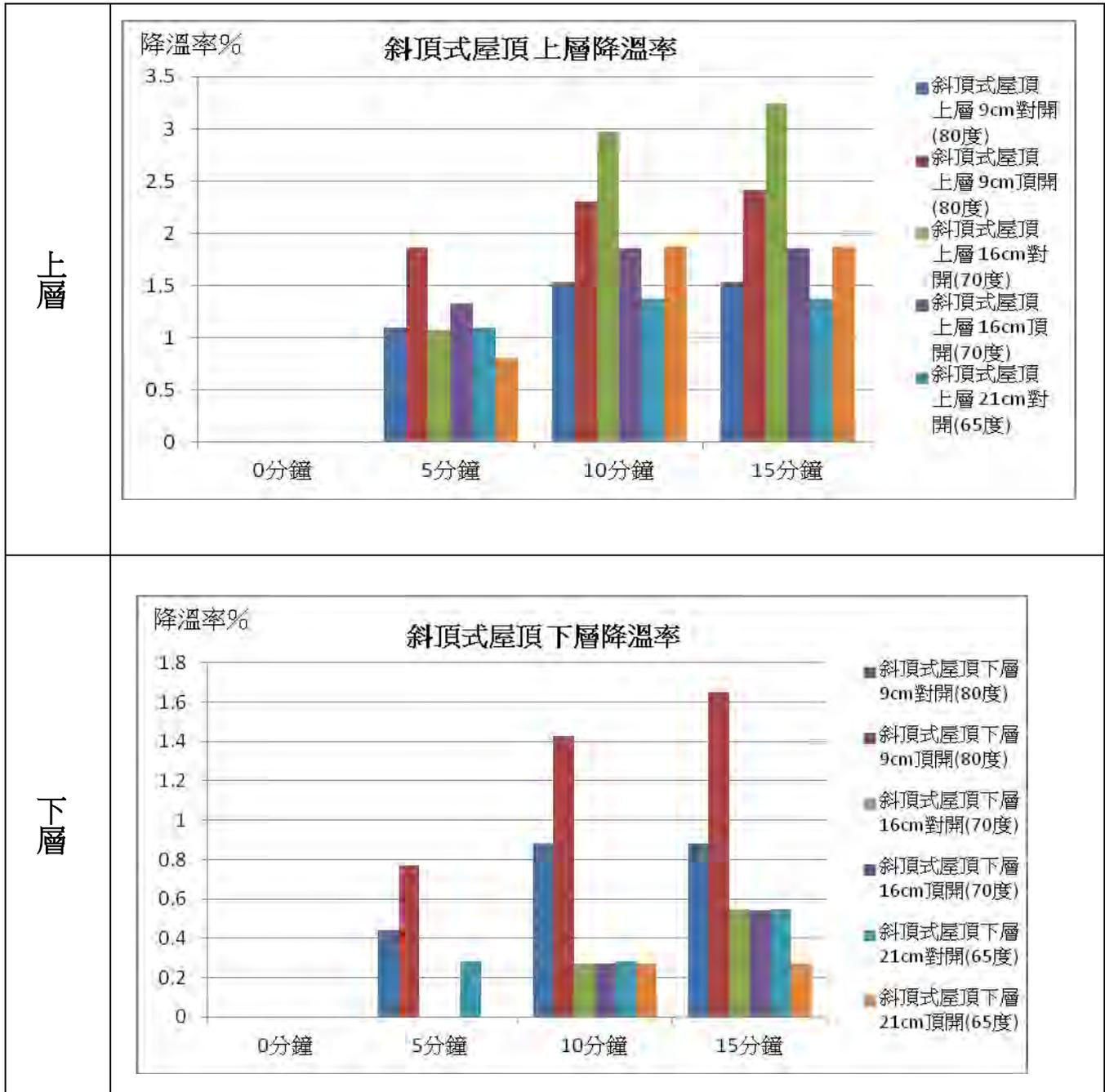


表 5-2-2-3：斜頂式屋頂有風有開窗上下層的降溫率



由表 5-2-2-1~3 中，我們發現不管是對開還是頂開，風扇吹風時間越久降溫率越好，而且上層降溫率都比下層高。在頂高 9cm、屋頂角度大的（80 度）上層的降溫率，頂開比對開好，但是在頂高 16cm 屋頂角度 70 度時，上層降溫率對開又比頂開好。而頂高 21cm、屋頂角度 65 度，不管對開還是頂開，上層降溫率都很接近。反倒是下層除了頂高 9cm 屋頂角度 80 度 15 分鐘後的降溫率達 1.65% 之外，其它的都很低。

(三)圓拱形屋頂

表 5-2-3-1：圓拱型屋頂有風有開窗的降溫率

圓拱形屋 頂上層	降溫時間	0分鐘	5分鐘	10分鐘	15分鐘	圓拱形屋 頂下層	降溫時間	0分鐘	5分鐘	10分鐘	15分鐘
	降溫率%	9cm 對開	0.00	1.43	2.52		3.18	降溫率%	9cm 對開	0.00	1.17
	9cm 頂開	0.00	1.32	2.19	2.63		9cm 頂開	0.00	0.88	1.76	2.20
	16cm 對開	0.00	0.88	0.88	1.47		16cm 對開	0.00	0.00	0.58	1.16
	16cm 頂開	0.00	1.62	2.70	4.08		16cm 頂開	0.00	3.80	4.08	4.86
	21cm 對開	0.00	0.37	0.49	0.74		21cm 對開	0.00	0.64	1.09	1.92
	21cm 頂開	0.00	0.51	1.19	1.50		21cm 頂開	0.00	0.20	0.39	0.67

表 5-2-3-2：圓拱型屋頂有風有開窗的降溫率圖

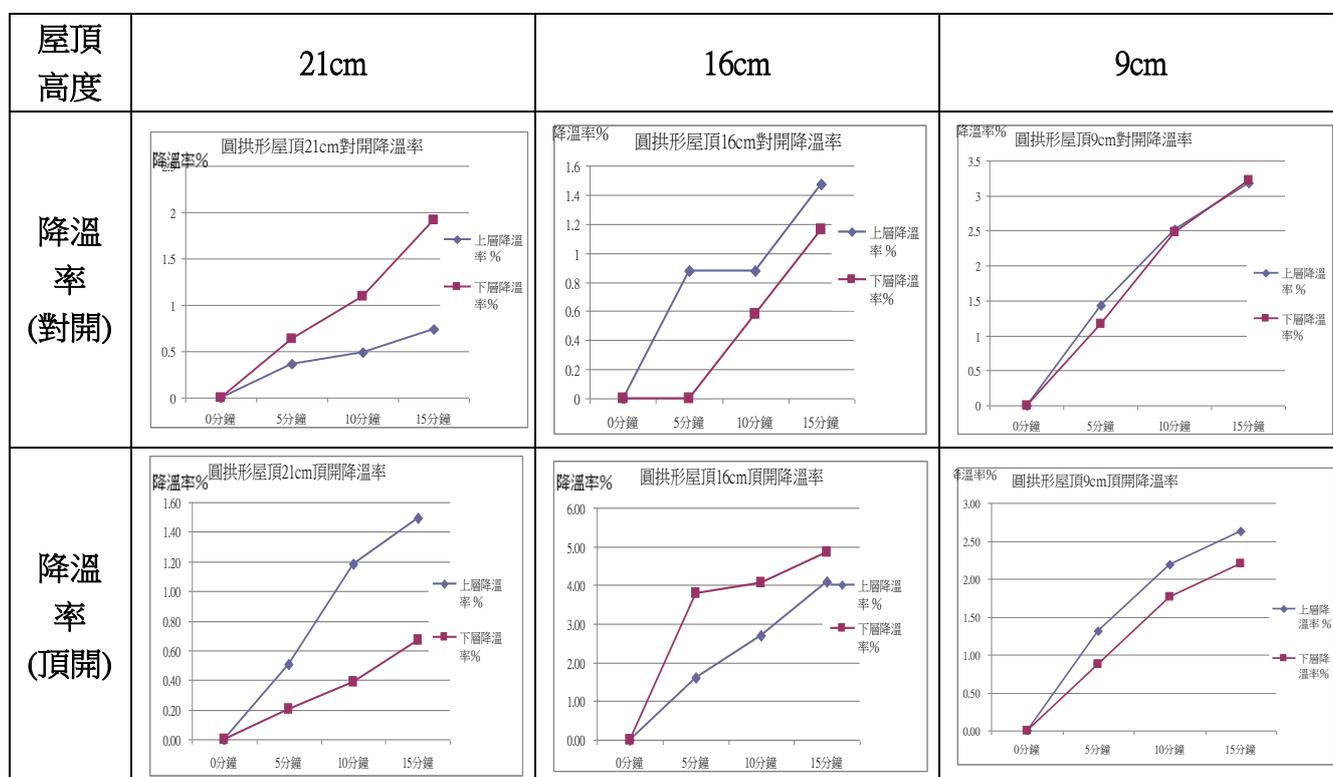
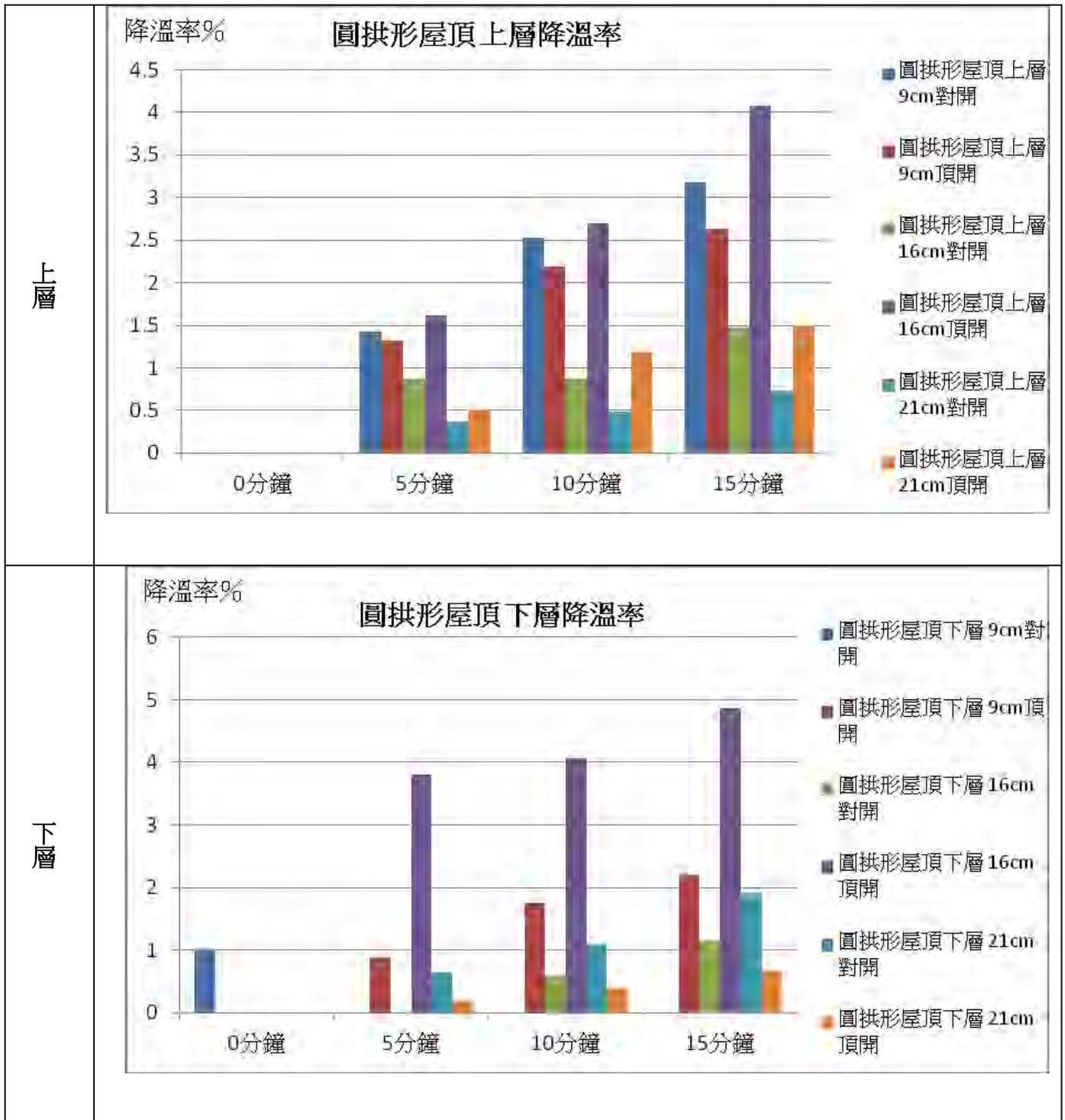


表 5-2-3-3：圓拱型屋頂有風有開窗上下層的降溫率圖



由表 5-2-3-1~3 圓拱形屋頂的降溫率，我們觀察到有趣的現象。屋頂的弧高在 9cm 時，窗口對開上層和下層的降溫率十分相當；窗口頂開的時候上下層降溫率也很接近。雖然對開降溫率優於頂開，但是彼此降溫率差異不太大。

但是當弧高達 16cm 時，對開和頂開的差異更大，不論是上層還是下層，頂開的降溫率高過對開達 3 倍之多，而且頂開上下層的降溫率十分接近。當弧高到達 21cm 時，上下層的降溫率大幅下降，對開和頂開上下層降溫率正好相反。

三、各類型屋頂降溫率大小的比較

綜合以上結果，我們把降溫 15 分鐘後上下層的降溫率整理如下，並且每一層與最低的降溫率相比較，得到的倍數：

(一) 各類型屋頂的降溫率÷最低降溫率的值

表 5-3-1 :各類型屋頂的降溫率/最低降溫率的值

	屋頂角度或高度	降溫率	倍數		屋頂角度或高度	降溫率	倍數
山形屋頂上層	9cm 對開(150 度)	6.27	8.48	山形屋頂下層	9cm 對開(150 度)	3.85	14.26
	9cm 頂開(150 度)	2.75	3.72		9cm 頂開(150 度)	1.39	5.15
	16cm 對開(120 度)	3.04	4.11		16cm 對開(120 度)	0.60	2.22
	16cm 頂開(120 度)	1.94	2.62		16cm 頂開(120 度)	0.49	1.80
	21cm 對開(90 度)	2.50	3.38		21cm 對開(90 度)	0.30	1.11
	21cm 頂開(90 度)	1.34	1.82		21cm 頂開(90 度)	1.24	4.58
	斜頂式屋頂上層	9cm 對開(80 度)	1.5		2.08	斜頂式屋頂下層	9cm 對開(80 度)
9cm 頂開(80 度)		2.4	3.26	9cm 頂開(80 度)	1.7		6.11
16cm 對開(70 度)		3.24	4.38	16cm 對開(70 度)	0.55		2.04
16cm 頂開(70 度)		1.86	2.51	16cm 頂開(70 度)	0.54		2.00
21cm 對開(65 度)		1.38	1.86	21cm 對開(65 度)	0.55		2.04
21cm 頂開(65 度)		1.88	2.54	21cm 頂開(65 度)	0.27		1.00
圓拱形屋頂上層	9cm 對開	3.18	4.30	圓拱形屋頂下層	9cm 對開	3.22	11.91
	9cm 頂開	2.63	3.56		9cm 頂開	2.20	8.16
	16cm 對開	1.47	1.99		16cm 對開	1.16	4.30
	16cm 頂開	4.08	5.51		16cm 頂開	4.86	18.00
	21cm 對開	0.74	1.00		21cm 對開	1.92	7.10
	21cm 頂開	1.50	2.02		21cm 頂開	0.67	2.48

我們發現，山形屋頂 150 度(9cm)的上層的降溫率是所有屋頂中降溫率最好的，是圓拱形頂高 21cm 對開的 8.48 倍。其次是圓拱形頂高 16cm 頂開是圓拱形頂高 21cm 對開的 5.51 倍。下層降溫率則以圓拱形頂高 16cm 頂開為表現最優，是斜頂式屋頂 65 度(21cm)的 18 倍。其次是山形屋頂 150 度(9cm)對開是斜頂式屋頂 65 度(21cm)的 14.26 倍。

(二)各種溫室上下層平均降溫率，分別以對開和頂開的比較

表 5-3-2-1 對開的各組比較		圖 5-3-2-1 對開的各組比較
屋頂形狀與條件	上下層平均降溫率	
山形 9cm 對開(150 度)	5.06	
圓拱形 9cm 對開	3.20	
斜頂式 16cm 對開(70 度)	1.90	
山形 16cm 對開(120 度)	1.82	
山形 21cm 對開(90 度)	1.40	
圓拱形 21cm 對開	1.33	
圓拱形 16cm 對開	1.32	
斜頂式 9cm 對開(80 度)	1.21	
斜頂式 21cm 對開(65 度)	0.97	

表 5-3-2-2 頂開的各組比較		圖 5-3-2-2 頂開的各組比較
屋頂形狀與條件	上下層平均降溫率	
圓拱形 16cm 頂開	4.47	
圓拱形 9cm 頂開	2.42	
山形 9cm 頂開(150 度)	2.07	
斜頂式 9cm 頂開(80 度)	2.03	
山形 21cm 頂開(90 度)	1.29	
山形 16cm 頂開(120 度)	1.21	
斜頂式 16cm 頂開(70 度)	1.20	
圓拱形 21cm 頂開	1.08	
斜頂式 21cm 頂開(65 度)	1.07	

1.我們發現以對開的平均降溫率對開而言

- (1).山形：150 度(9cm) > 120 度(16cm) > 90 度(21cm)
- (2).斜頂式：70 度(16cm) > 80 度(9cm) > 65 度(21cm)
- (3).圓拱型：頂高 9cm > 21cm > 16cm
- (4) 若是屋頂不分形狀，則前三名為：山形 150 度(頂高 9cm) > 圓拱型頂高 9cm > 斜頂式 70 度(頂高 16cm)

以上我們發現對開平均降溫率，多半是頂高較矮的溫室。我們懷疑是否和出風口和屋頂的水平氣流較接近。而且，頂高較的矮山型和斜頂型角度大，較平滑有助類似的伯努力效應產生。然

而圓拱形的屋頂更容易產生。

2.若以頂開降溫率而言：

(1).山形：150 度(9cm) > 120 度(16cm) > 90 度(21cm)

(2).斜頂式：80 度(9cm) > 70 度(16cm) > 65 度(21cm)

(3).圓拱型：頂高 16cm > 9cm > 21cm

(4).若是屋頂不分形狀，則前三名為：圓拱型頂高 16cm > 圓拱型頂高 9cm > 山形 150 度(頂高 9cm)

以上我們發現頂開降溫率，多半也是頂高較矮的溫室。而且，頂高較的矮山型和矮斜頂型角度大，較平滑有助類似的伯努力效應產生。而圓拱形卻是頂高 16cm 的為最佳，21cm 最差。

由以上數據，我們把每種形狀的屋頂找出整體降溫率(上下層平均)最好的兩個來進行比較。請看我們以下的分析。

(三) 整體降溫率最佳的山形、斜頂式和圓拱形屋頂之比較

表 5-3-2 整體降溫率最佳的山形、斜頂式和圓拱形屋頂之比較

屋頂形式		上層降溫率	下層降溫率	平均降溫率
山形屋頂	9cm 對開(150 度)	6.27	3.85	5.06
	9cm 頂開(150 度)	2.75	1.39	2.07
斜頂式屋頂	9cm 頂開(80 度)	2.40	1.70	2.03
	16cm 對開(70 度)	3.24	0.55	1.90
圓拱形屋頂	9cm 對開	3.18	3.22	3.20
	16cm 頂開	4.08	4.86	4.47

由以上的結果，我們發現整體降溫率最好的是山形 9cm(150 度)對開，平均降溫率是 5.06%。其次是圓拱型頂高 16cm 頂開 4.47%。再來是圓拱型頂高 9cm 對開 3.20%。

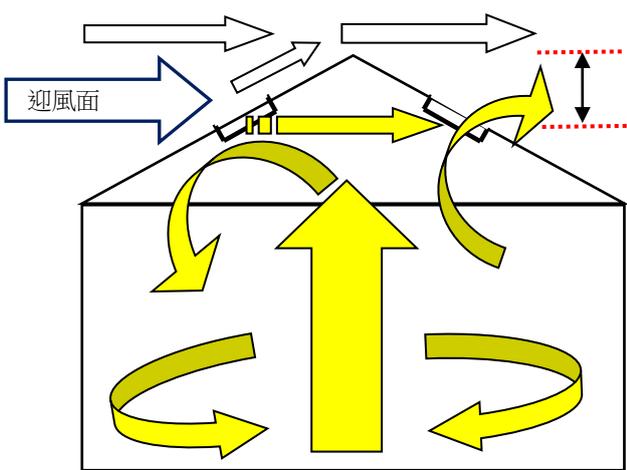
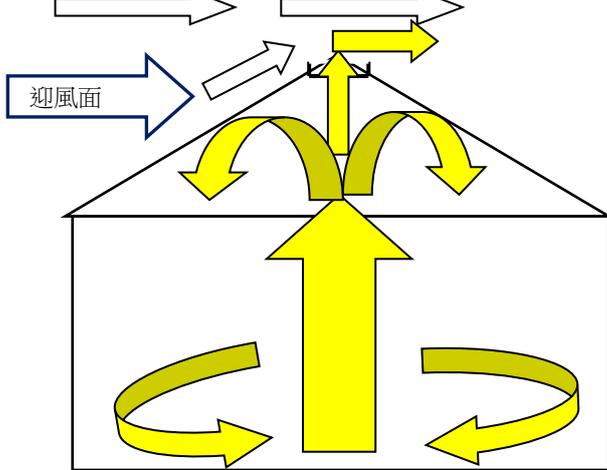
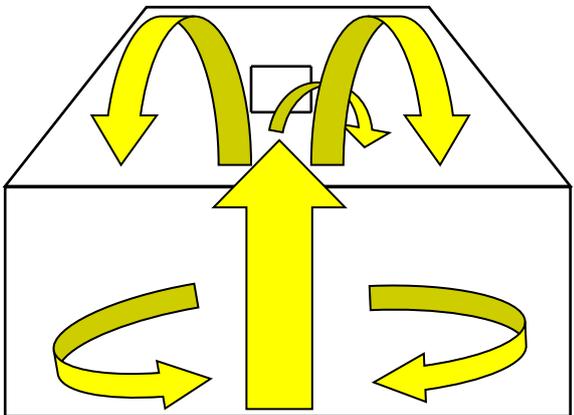
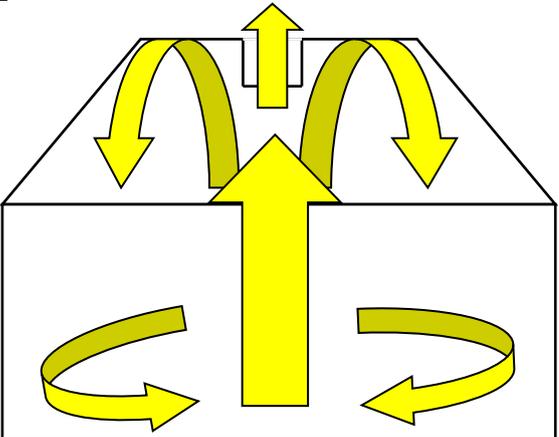
我們十分好奇，為什麼會有這樣的結果，特別是山形 9cm(150 度)對開上層的降溫率極佳，和下層差異很大，斜頂式 16cm(70 度)對開也是上下層差異大；又圓拱型 9cm 對開和 16cm 頂開上下層都很接近，且 16cm 頂開表現最為突出。

我們思考是否是因為風吹向屋頂時跟溫室的開窗位置有關，導致內部的熱流排出的快與慢。

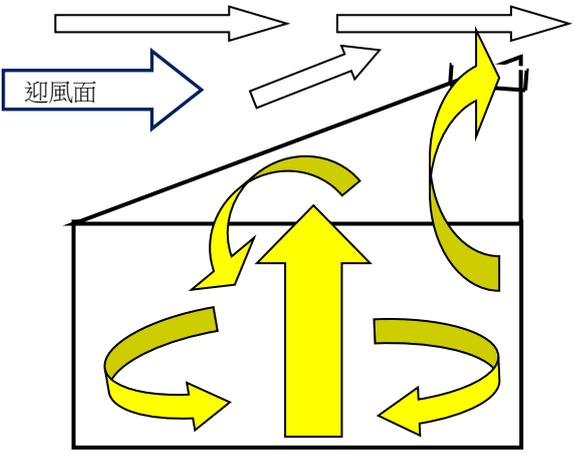
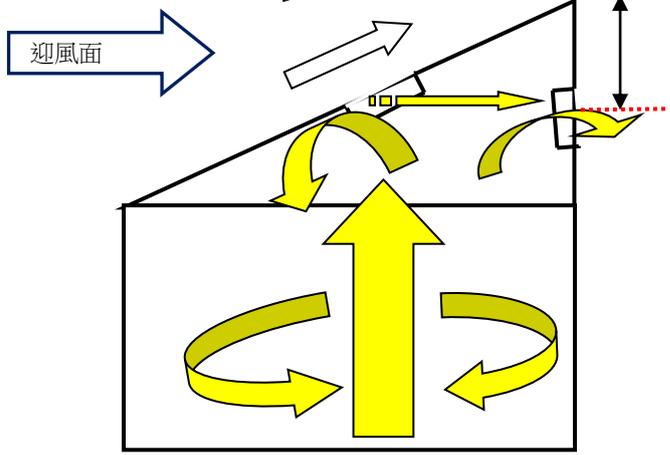
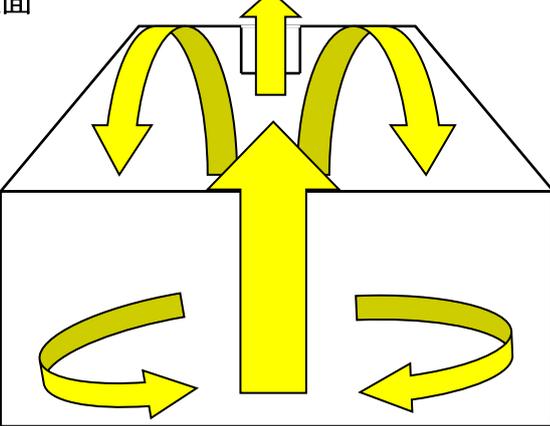
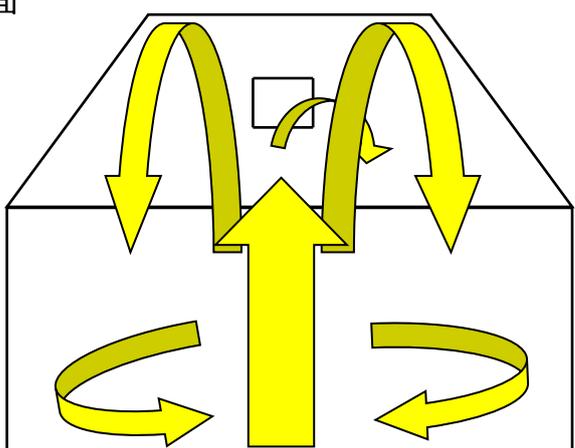
所以，我們就進一步探討，當溫室外有風吹，這幾個降溫率較好的溫室內部的氣流如何流動或排出。請看我們以下用蚊香的煙在溫室內流動模式的分析。

四、不同形式的溫室屋頂在對開和頂開時溫室內部煙流走向的比較

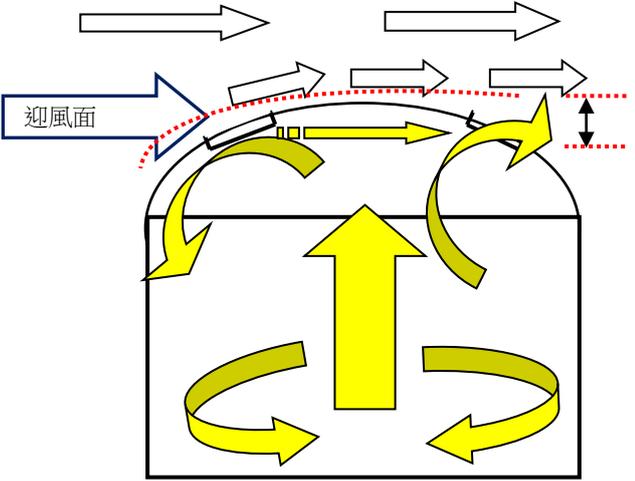
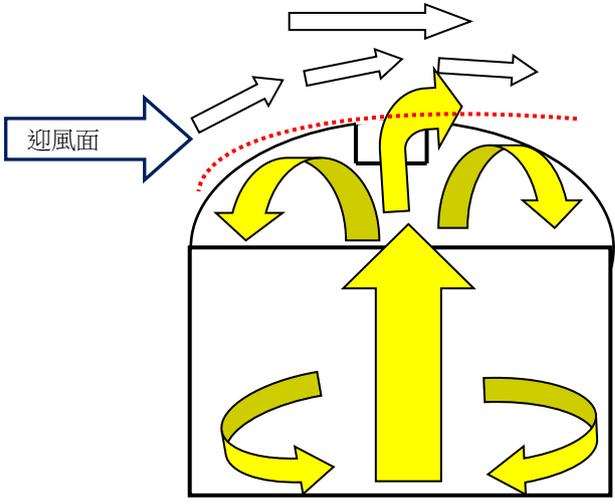
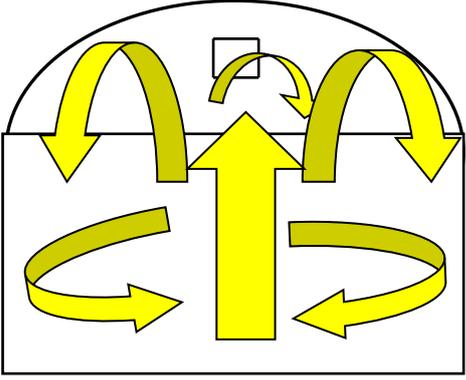
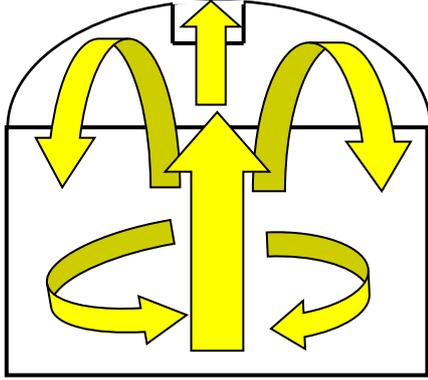
(一)山形屋頂

圖 5-4-1 150 度(頂高 9cm) 對開	圖 5-4-2 150 度(頂高 9cm) 頂開
<p style="text-align: right;">(側面)</p> 	<p style="text-align: right;">(側面)</p> 
<p>(正面)</p> 	<p>(正面)</p> 
<p>起初有煙柱大量上升，到屋頂時就下降形成煙瀑到底部。有部分跟著再次慢慢上升，有些則在下方形成煙環順時針或逆時針轉動。</p> <p>上方窗邊的煙流，若是迎風面的那扇窗，風會把將要冒出的煙吹回溫室裡。背風面的那扇窗，我們發現有煙流像抽絲的樣子排出。</p>	<p>起初有煙柱大量上升，若是煙流到到屋頂窗口時，就被風吹出去了，從我們的肉眼看到被排出的煙並沒有對開多。若是碰到屋頂的就慢慢下降形成煙瀑到底部。有部分跟著再次慢慢上升，有些則在下方形成煙環順時針或逆時針轉動。</p>

(二)斜頂式屋頂

圖 5-4-3 80 度(頂高 9cm) 頂開	圖 5-4-4 70 度(頂高 16cm) 對開
<p style="text-align: right;">側面</p> 	<p style="text-align: right;">側面</p> 
<p>正面</p> 	<p>正面</p> 
<p>和山形頂開也有類似的情形，起初有煙柱大量緩緩上升，若是煙流到到屋頂窗口時，就被風吹出去了，若是碰到屋頂的就慢慢下降形成煙瀑到底部。有部分跟著再次慢慢上升，有些則在下方形形成煙環順時針或逆時針轉動。</p>	<p>和山形對開也有類似的情形，起初有煙柱大量慢慢上升，到屋頂時就下降形成煙瀑到底部。有部分跟著再次上升，有些則在下方形形成煙環順時針或逆時針轉動。</p> <p>上方窗邊的煙流，若是迎風面的那扇窗，風會把將要冒出的煙吹回溫室裡。背風面的那扇窗，我們發現有一些煙排出。感覺排煙量比 80 度的大，但是流動較緩慢，下方還是聚集很大的煙圈。</p>

(三)圓拱型屋頂

圖 5-4-5 頂高 9cm 對開	圖 5-4-6 頂高 16cm 頂開
<p style="text-align: right;">側面</p> 	<p style="text-align: right;">側面</p> 
<p style="text-align: right;">正面</p> 	<p style="text-align: right;">正面</p> 
<p>和前二種溫室的情形相似，起初有煙柱大量緩慢上升，到屋頂時就下降形成煙瀑到底部。有部分跟著再次上升，有些則在下方形成煙環順時針或逆時針轉動。</p> <p>上方窗邊的煙流，若是迎風面的那扇窗，風會把將要冒出的煙吹回溫室裡。背風面的那扇窗，我們發現有煙排出。</p>	<p>起初也是有煙柱大量上升，若是煙流到到屋頂窗口時，就被風吹出去了，從我們的肉眼看到被排出的煙好像被拉絲一樣，感覺一直被抽走。若是碰到屋頂的煙流就下降形成煙瀑到底部。有部分跟著再次上升，流動的似乎比較快的感覺，有些則在下方形成煙環順時針或逆時針轉動。</p>

我們發現對開窗的溫室，在兩扇窗口附近隱約有煙從迎風面的窗口流到背風面的窗口出去，山形 150 度(9cm)的溫室比較明顯觀察，或許因為這兩扇窗口距離比較近，因此煙容易排出。所以我們認為這是山形和斜頂式對開窗的上層降溫率高於下層的原因。

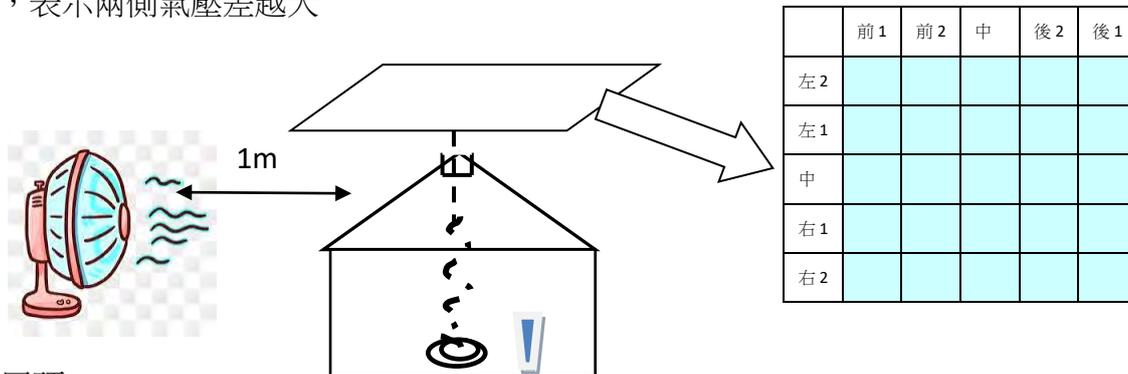
而圓拱型溫室 9cm 對開也有類似的現象，但是其和圓拱型 16cm 溫室呈現的是，上下層的降溫率趨近一致。我們推測可能受外面氣流滑過圓弧屋頂，產生類似伯努力效應的影響而造成的現

象。因此，我們想再進一步利用可愛小風車與慢速播放軟體來做屋頂風場的分析，來了解其中是否有因果關係。

五、屋頂之上方 3cm 平面之風場圖分析

我們在屋頂位置 3 公分假想有一與底面積相同的平面，劃分為 25 格區域(開窗位置由紅色數字表示)，可愛小風車在每種屋頂上方轉速之數據整理測量每格的風速，其結果如下。

轉速越快，表示兩側氣壓差越大



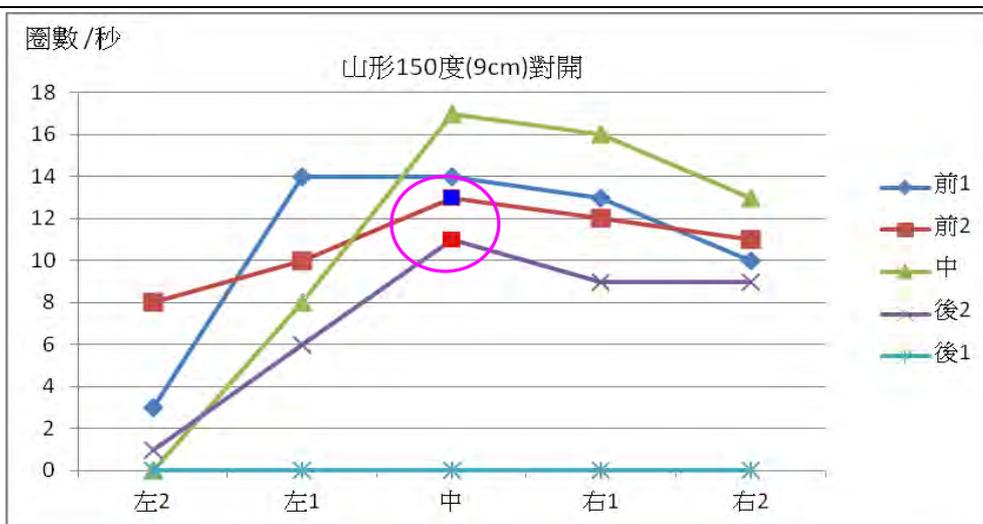
(一)山形屋頂

表 5-5-1-1 山形屋頂 150 度(9cm)對開

※紅色數字代表窗口位

	左 2	左 1	中	右 1	右 2
前 1	3	14	14	13	10
前 2	8	10	13	12	11
中	0	8	17	16	13
後 2	1	6	11	9	9
後 1	0	0	0	0	0

圖 5-5-1-1 山形屋頂 150 度(9cm)對開



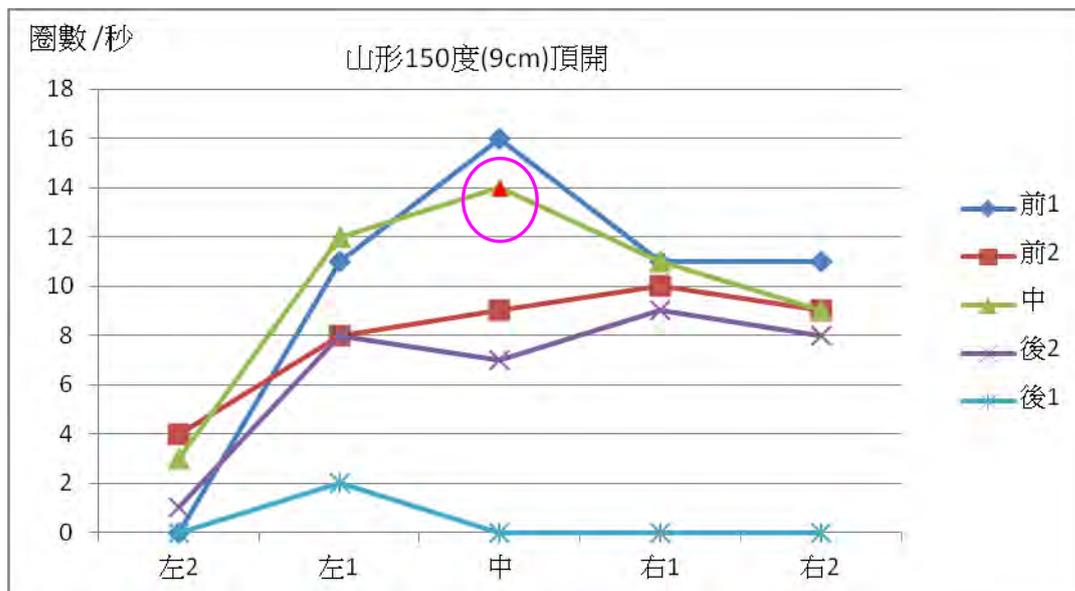
由此數據分析中我們發現山型的屋頂在 9cm(150 度)對開時，在屋頂正中央(中-中)位置的小風扇，轉得比其他位置快，顯示那個位置風流速較周圍快，我們查閱文獻知道與伯努力定律有關，但是正中央前後開了對窗，我們也發現背風面開窗的風扇風速也很快。表示除了來自電風扇吹的風之外，還有可能是溫室裏面熱空氣排出的加乘效果。中央的位置之風速皆較兩側為快。

表 5-5-1-2 山形屋頂 150 度(9cm)頂開

※紅色數字代表窗口位

	左 2	左 1	中	右 1	右 2
前 1	0	11	16	11	11
前 2	4	8	9	10	9
中	3	12	14	11	9
後 2	1	8	7	9	8
後 1	0	2	0	0	0

圖 5-5-1-2 山形屋頂 150 度(9cm)頂開



由此數據分析中我們發現山形的屋頂在 9cm(150 度)頂開時，在屋頂前方中央(中-中)位置的小風扇，除了轉得比其他位置快，顯示那個位置風流速較周圍快，我們查閱文獻知道可能有伯努力效應，表示除了來自電風扇吹的風之外，還有可能是溫室裏面熱空氣上升的加乘效果。中央的位置之風速皆較兩側為快。

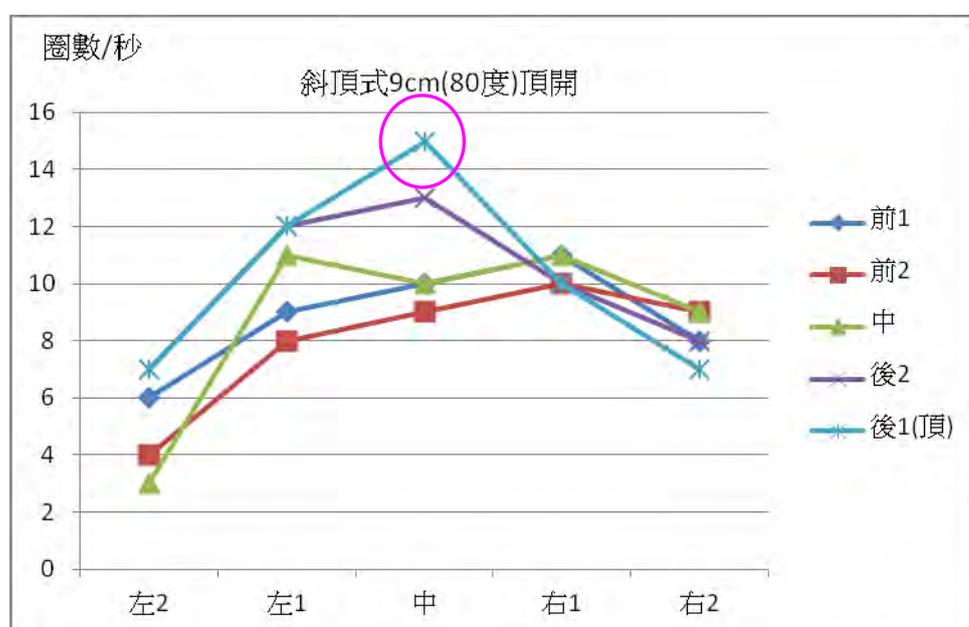
(二)斜頂式屋頂

表 5-5-2-1 斜頂式 9cm(80 度)頂開

※紅色數字代表窗口位

	左 2	左 1	中	右 1	右 2
前 1	6	9	10	11	8
前 2	4	8	9	10	9
中	3	11	10	11	9
後 2	7	12	13	10	8
後 1(頂)	7	12	15	10	7

圖 5-5-2-1 斜頂式 9cm(80 度)頂開



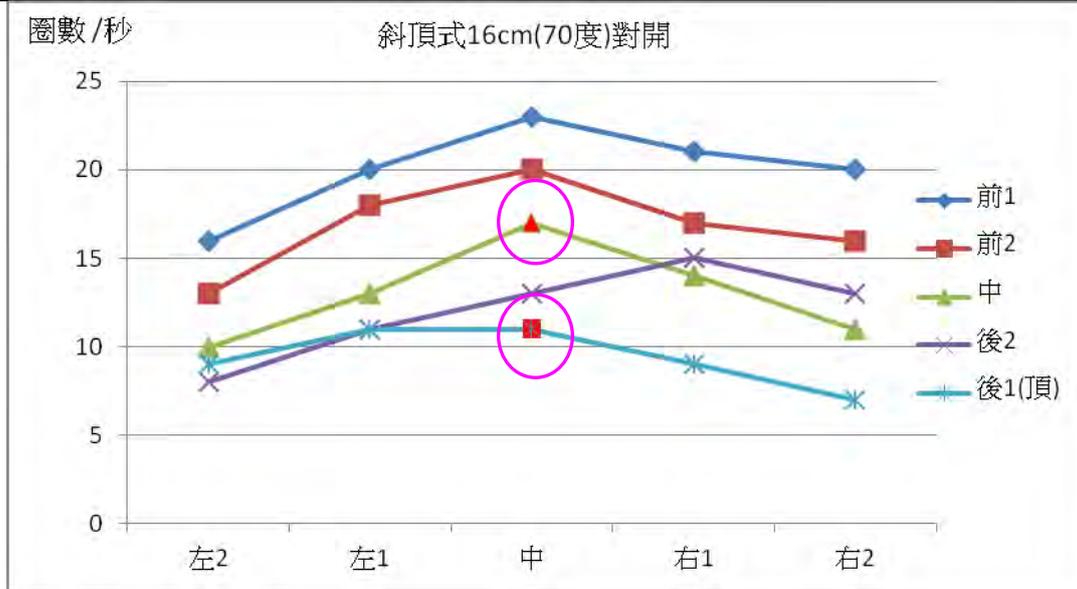
由此數據分析中我們發現斜頂式的屋頂在 9cm 對開時，在屋頂最後排的正中央(後 2-中)位置的小風扇，轉得比他四周位置快，顯示那個位置風流速較周圍快，我們查閱文獻知道可能有類似伯努力效應，所以表示除了來自電風扇吹的風之外，還有可能是溫室裏面熱空氣上升的加乘效果。中央的位置之風速皆較兩側為快。

表 5-5-2-2 斜頂式 16cm(70 度)對開

※紅色數字代表窗口位

	左 2	左 1	中	右 1	右 2
前 1	16	20	23	21	20
前 2	13	18	20	17	16
中	10	13	17	14	11
後 2	8	11	13	15	13
後 1(頂)	9	11	11	9	7

圖 5-5-2-2 斜頂式 16cm(70 度)對開



由此數據分析中我們發現斜頂式的屋頂在 16cm 對開時，在屋頂正中央(中-中)位置的小風扇，轉得比他周圍位置快，顯示那個位置風流速較周圍快，我們查閱文獻知道與伯努力定律有關，但是正中央前後開了對窗，我們也發現背風面開窗的風扇風速也很快。表示除了來自電風扇吹的風之外，還有可能是溫室裏面熱空氣排出的加乘效果。中央的位置之風速皆較兩側為快。

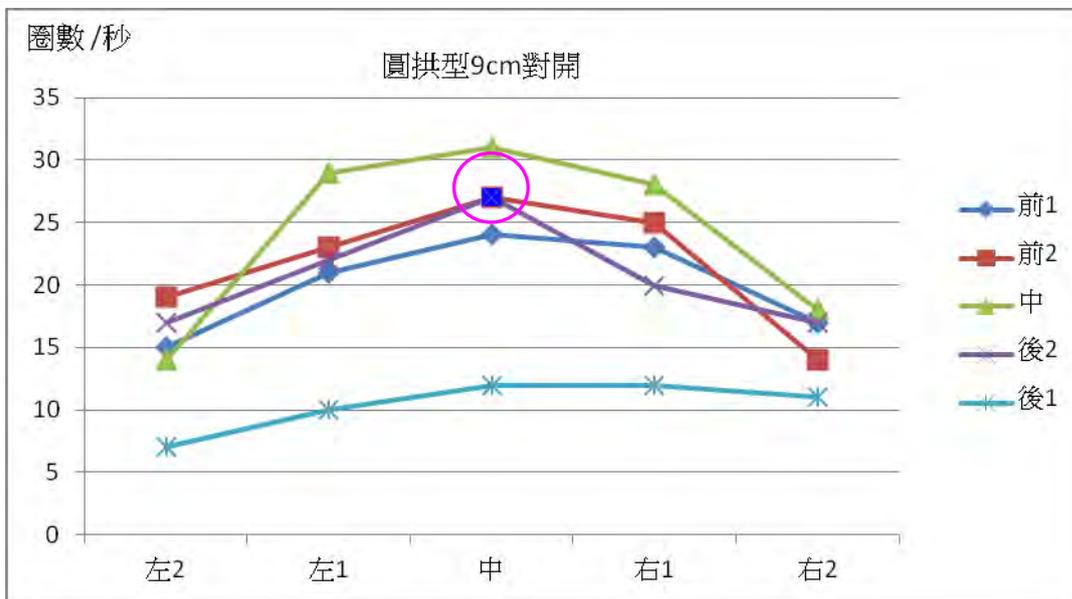
(三) 圓拱形屋頂

表 5-5-3-1 圓拱型頂高 9cm 對開

	左 2	左 1	中	右 1	右 2
前 1	15	21	24	23	17
前 2	19	23	27	25	14
中	14	29	31	28	18
後 2	17	22	27	20	17
後 1	7	10	12	12	11

※紅色數字代表窗口位

圖 5-5-3-1 圓拱型頂高 9cm 對開



由此數據分析中我們發現圓拱型的屋頂在 9cm 對開時，在屋頂正中央(中-中)位置的小風扇，轉得比其他位置快，顯示那個位置風流速較周圍快，我們查閱文獻知道與伯努力定律有關，但是正中央前後開了對窗，我們也發現風扇轉速也很快。表示除了來自電風扇吹的風之外，還有可能是溫室裏面熱空氣上升的加乘效果。

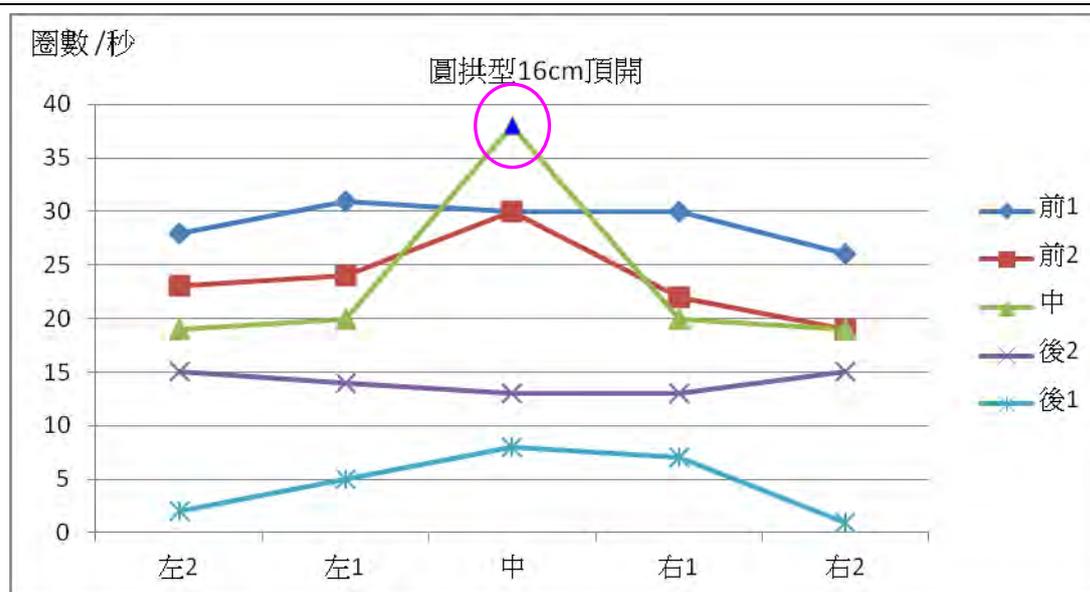
中央的位置之風速皆較兩側為快，兩側風速接近對稱。若比較前 1、前 2、中、後 2、後 1 的位置，則以中間的位置之平均風速較快。

表 5-5-3-2 圓拱型頂高 16cm 頂開

※紅色數字代表窗口位

	左 2	左 1	中	右 1	右 2
前 1	28	31	30	30	26
前 2	23	24	30	22	19
中	19	20	38	20	19
後 2	15	14	13	13	15
後 1	2	5	8	7	1

圖 5-5-3-2 圓拱型頂高 16cm 頂開



由此數據分析中我們發現圓拱型的屋頂在 16cm 頂開時，在屋頂正中央(中-中)位置的小風扇，轉得比其他位置快，顯示那個位置風流速較周圍快，我們查閱文獻知道與伯努力定律有關，表示除了來自電風扇吹的風之外，還有可能是溫室裏面熱空氣上升的加乘效果。

1. 中央的位置之風速皆較兩側為快，兩側風速接近對稱。
2. 若比較前 1、前 2、中、後 2、後 1 的位置，則以中間的位置之平均風速較快。

陸、 綜合討論

利用煙流模型和屋頂外面風場的分析來佐證我們提出的論點。由以上的結果，我們在每一種形狀的屋頂會造成不同的風場，會影響溫室降溫。所以以上的分析大致獲得以下的結論：

(一)山形屋頂

1. 以山形屋頂的溫室而言，屋頂角度越大，屋頂高度越矮，不管是對開窗還是頂開窗，它的平均降溫率比較好。但是有趣的是，上層降溫率竟比下層好，特別是對開窗的我們在觀察煙流的時候，也發現下層煙環較大，上層迎風面窗口的煙被吹回去，在背風面窗口流出來現象較明顯。我們用煙流模式(圖 5-4-1)推測，屋頂的平行風離背風面窗口很近，造成煙流很快被吸走，極有可能窗口間氣流互通造成，從風場分析(圖 5-5-1-1)得知迎風面和背風面窗口，風速較大。因為屋頂角度大且平緩，可能有類似伯努力效應形成，造成它降溫效果佳。
2. 頂開窗的雖然上下層有差異，但差異沒這麼大，降溫率也較對開差。由煙流模式圖 5-4-2 我們覺得風扇的風沿屋簷向上爬升的氣流有阻礙屋頂上方的平行氣流，導致頂開窗的煙流變慢，影響降溫率。

(二)斜頂式屋頂

1. 我們發現斜頂式溫室在頂開的降溫率優於對開。特別是 80 度 9cm 頂高頂開的溫室降溫率 and 山形 150 度頂開的降溫率極為接近，我們推測這兩個溫室的迎風面角度相當，窗口位置相當。所以其降溫率十分接近。
2. 在 16cm 對開的上層降溫率表現不錯，由風場分析(圖 5-5-2-1)我們推測兩窗口互通所以窗口的溫度可能較低。但是下方上升的煙流若是離窗口較遠的，一樣形成煙瀑流到下層，使下層溫度仍偏高。頂高越高，就算是對開，開口也距離屋頂上方平行風較遠，煙流不易排出。

(三)圓拱形屋頂

1. 頂高 21cm 的(弧長最長，是圓的半徑)，不管是對開還是頂開降溫率都不佳，特別是頂開，降溫率才 1.08%，也就是伯努力效應低。圓拱型 16cm 的整體降溫效果很好，特別是在 16cm 頂開，上下層降溫率十分接近，伯努力原理的效應有發生，也就是圖 6-1~6-2 所示，當平行風滑過拱形屋頂時，其速率會變快，造成溫室兩前後有壓力差，也就是風扇轉速會增加，特別是中間頂端，果不其然頂端風速最大(圖 5-5-3-2)【轉速越快，表示前後氣壓差越大】。若是在最高點開天窗，更有助於溫室內的熱氣排出，也就是整個溫室內的氣流不是局部在動，而是大部

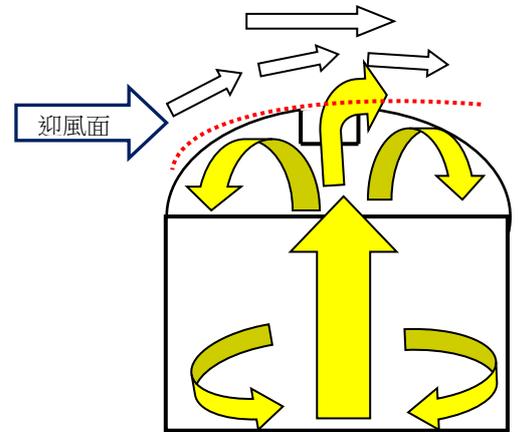


圖 6-1 氣流流經拱形屋頂示意圖

	左1	左2	中	右2	右1
前1	28	31	30	30	26
前2	23	24	30	22	19
中	19	20	38	20	19
後2	15	14	13	13	15
後1	2	5	8	7	1

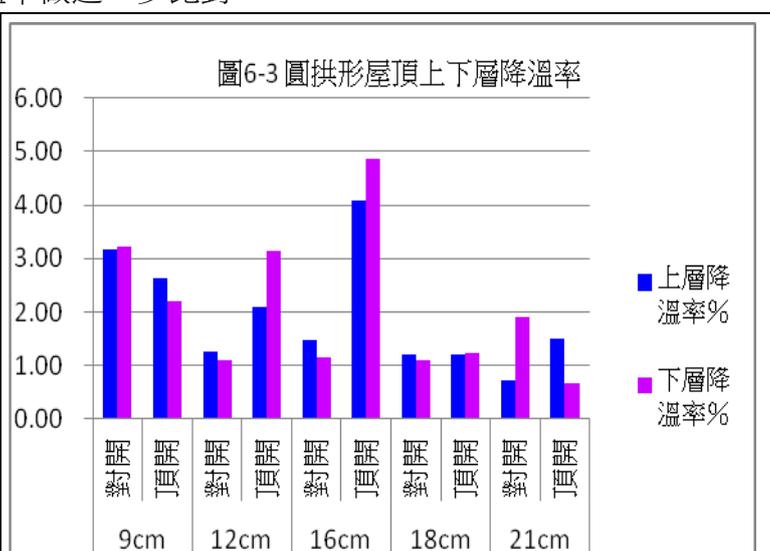
圖 6-2 圓拱型 16cm 頂開低壓中心示意圖

分藉由頂端排出而帶動氣流整個的擾動，慢慢可能可以趨近一致，所以我們可以推測，這是它在短時間內無法提太多的降溫率的原因。而且上下層降溫率趨近一致對植物有利，因為我們植栽大多在地上，下層不宜太熱。

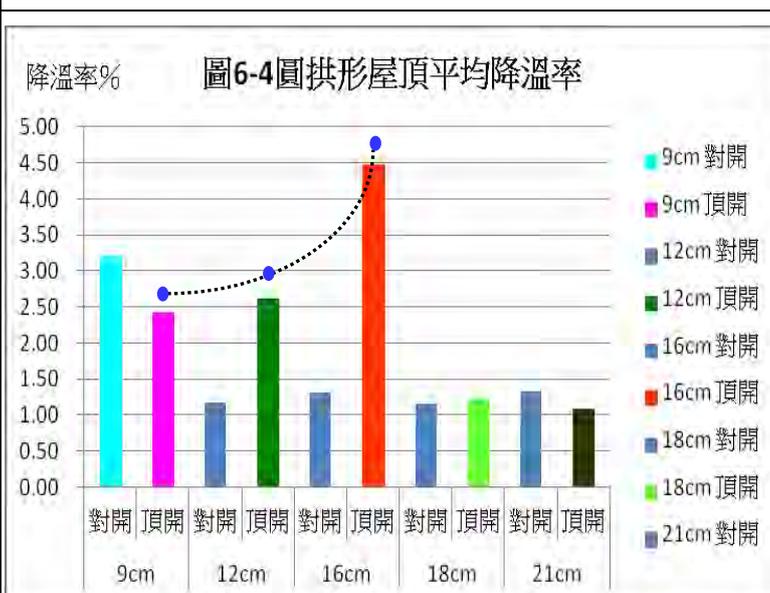
2. 在我們的研究裡，頂高 9cm 開對窗降溫率緊迫在後，上層迎風面窗口的煙被吹回去，在背風面窗口流出來現象較明顯。我們用煙流模式(圖 5-4-5)推測，屋頂的平行風滑過屋頂，也會形成一個氣流，離背風面窗口很近，造成煙流很快被吸走，再加上極有可能窗口間氣流互通造成，從風場分析(圖 5-5-1-1)得知迎風面和背風面窗口，風速較大。

3. 既然如此，我們一直在思考：只要是拱形屋頂就可以了嗎?所以我們進一步多做了頂高 12cm 和 18cm 屋頂對開和頂開的降溫率做進一步比對：

頂高	開窗位置	上層降溫率%	下層降溫率%
9cm	對開	3.18	3.22
	頂開	2.63	2.20
12cm	對開	1.26	1.10
	頂開	2.09	3.14
16cm	對開	1.47	1.16
	頂開	4.08	4.86
18cm	對開	1.20	1.10
	頂開	1.20	1.24
21cm	對開	0.74	1.92
	頂開	1.50	0.67



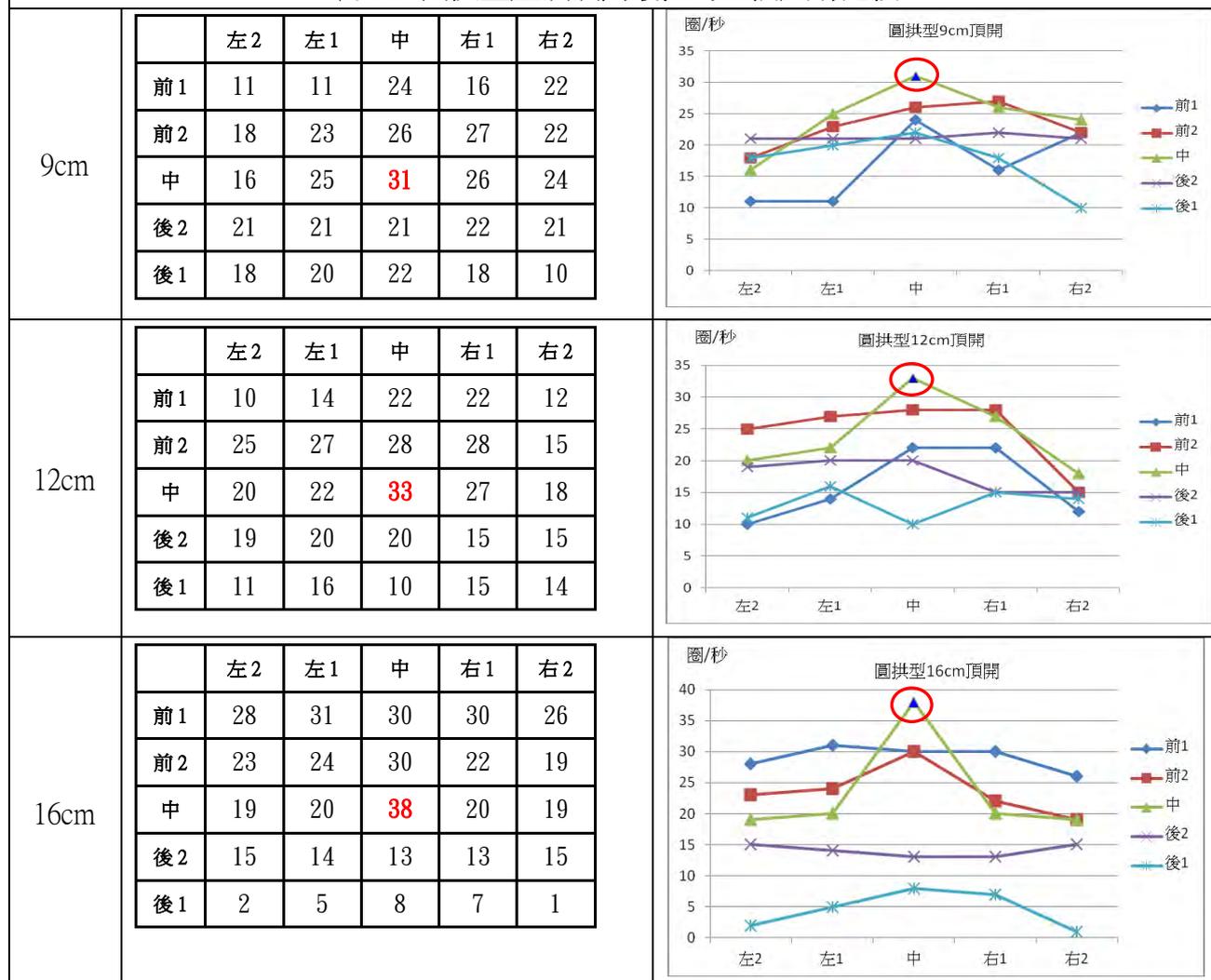
頂高	15 分鐘上下平均降溫率%	
9cm	對開	3.20
	頂開	2.42
12cm	對開	1.18
	頂開	2.62
16cm	對開	1.32
	頂開	4.47
18cm	對開	1.15
	頂開	1.22
21cm	對開	1.33
	頂開	1.08



以上圓拱型屋頂平均降溫率發現：頂高 18cm 無論是對開還是頂開，降溫率都和 21cm 的相去不遠，頂高 12cm 對開的也是如此。但是以頂開而言，頂高從 9cm、12cm 到 16cm，

其降溫率是逐漸上升（圖 6-4）。頂高 16cm 頂開仍是圓拱型屋頂中最好的。我們進一步用屋頂上的風場分析如下：

表 6-3 圓拱型屋頂頂開最佳的三個風場比較



由表 6-3 風場比較中也發現，中央窗口小風扇圈速也是從 9cm 到 16cm 逐漸增加，頂高 16cm 仍是最快，伯努力效應是較好的。

所以我們可以由以上實驗得知：不是弧長越長、頂高越高降溫就越好，也不是越低越好。不過頂高陸續下降到 12cm、9cm 頂開時平均降溫率也降，但是仍高過其它多數的不同型態的屋頂。若再下降高度也會使降溫率變差，因為沒甚麼弧度，所以溫室兩側壓力差更小。

綜合以上，我們認為圓拱形屋頂 16cm 頂開上下層的降溫效果好，再高增高或降低都會影響降溫率，所以 16cm 頂開最值得開發利用。

柒、 研究結論

綜合以上結果，我們的結論是：

一、各種屋頂對開和頂開的降溫率最好的比較：

(1).山形：150 度(9cm)對開 > 150 度(9cm)頂開

(2).斜頂式：80 度(9cm)頂開 > 70 度(16cm)對開

(3).圓拱型：頂高 16cm 頂開 > 9cm 對開

也就是頂高較矮、角度大的屋頂，降溫率較好。

二、平均降溫率最好的是山形 150 度(9cm)對開，但是下層降溫效果較差，較不利種在地上的植物。圓拱型 16cm 頂開的平均降溫率，雖不若前者佳，但是上下層降溫率趨近一致，特別是下層降溫效果好有利於地面的農作物。而且頂高較低的圓拱形屋頂，其降溫率雖不如頂高 16cm 佳，但是比山形和斜頂式的多數屋頂而言，就好多了。

三、山形、斜頂式、圓拱型三種比較：

(一) 平均降溫率最佳的三名是：山形 9cm 對開(5.06%)、圓拱型 16cm 頂開(4.47%)、圓拱型 9cm 對開(3.20%)

(二)平均降溫率最差的三名是：斜頂式 21cm 對開(0.97%)、斜頂式 21cm 頂開(1.07%)、圓拱型 21cm 頂開(1.08%)。

(三)上下層降溫率最一致的是圓拱型 16cm 頂開(4.47%)。所以不是弧長越長、頂高越高降溫就越好，也不是越低越好。

四、開對窗的溫室上層降溫率通常較下層好，也就是常發現下層降溫極慢，由煙環在下面緩慢移動，向上的煙柱也很慢。

五、屋頂的角度較大或頂高較矮可能有利伯努力效應發生，以可愛小風車的轉速測量屋頂上風速，通常較快，也容易容易帶走溫室內的熱。

在能源短缺、電力不足的時代裡，尋找替代能源是刻不容緩的事。但是在找到之前，如何節省用電、節約能源，是我們現在必做的事。我們希望可以找出最合適的屋頂，讓我們在節省電源、節能減碳中盡一份心力。

捌、 參考文獻

- 一、 溫室，維基百科 <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E6%BA%AB%E5%AE%A4>
- 二、 圖 1
https://tw.images.search.yahoo.com/search/images?p=%E6%BA%AB%E5%AE%A4%E7%85%A7%E7%89%87&fr=yfp-search-sa&imgurl=http%3A%2F%2Fwww.twwiki.com%2Fuploads%2Fwiki%2F14%2Fea%2F703769_5.jpg#id=15&iurl=https%3A%2F%2Fupload.wikimedia.org%2Fwikipedia%2Fcommons%2Fc%2Fc7%2FGreenhouse.jpeg&action=click
- 三、 伯努力原理 <http://higscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=1524>
- 四、 溫室降溫的方法，方煒，台大農機系 <http://www.ecaa.ntu.edu.tw/weifang/Hort/chap05.htm>
- 五、 氣壓與風的形成，自然與生活科技第六冊-地科篇，南一版
- 六、 斜頂式溫室 <http://gichan.shiluo.com.tw/products.aspx?i=3>
- 五、 氣壓與風的形成，自然與生活科技第六冊-地科篇，南一版
- 六、 斜頂式溫室 <http://gichan.shiluo.com.tw/products.aspx?i=3>
- 七、 溫室結構設計，林聖泉 <http://agriauto.bime.ntu.edu.tw/printed/agrijournal/no.11/11-09.PDF>
- 八、 半圓柱形風壓係數之實驗研究，朱佳仁等 <http://www.twaes.org.tw/AE/htmldata/0000201618.pdf>

【評語】 032918

本作品探討不同形式屋頂與其開窗位置的降溫能力，與降溫相關之學理基礎是伯努力效應，構想有其意義，研究成果亦有實際應用價值，但內容稍嫌單薄。本作品在實驗前先做文獻回顧與初步觀察開窗位置的效果，另繪製實驗裝置方便理解，但未控制初始溫度亦未報導風速。作品缺點為結論表達不夠清晰，對實驗結果的解釋不夠完整，例如如何應用白努力定律解釋實驗結果。散熱機制包含強制對流與自然對流，本作品僅針對強制對流探討。此外，溫度量測選點皆在溫室角落點，並未考慮溫室中心與邊角落點可能也會出現溫度差異。

壹、研究動機

在中高緯度的地區，利用溫室來幫植物保暖和保濕，在炎熱的台灣，溫室內的氣溫很高也不通風，總要靠抽風機散熱，在夏季抽風機整天運轉，著實是耗電。所以我們在網路上搜尋資料，和老師討論之後，研究如何設計一個不用抽風機就可以自然『涼』的溫室。



圖 1-1 山形溫室

貳、文獻探討與研究問題

我們在預備實驗過程中，發現溫室都沒有窗口的時候，不管外面有沒有風，溫室內部降溫速率極慢，甚至於不降溫。不僅窗口是開在迎風面屋頂側邊降溫很差，連在接近牆邊的位置降溫效果也不好。但是若在屋頂開天窗和屋頂 1/2 處開對窗，都發現有降溫的效果。因此我們將模擬山形、拱形、斜頂式屋頂作個小溫室，用電風扇來模擬自然風來進行研究。(參考資料七)。因此今年我們將模擬山形、拱形、斜頂式屋頂作個小溫室，用電風扇來模擬自然風來進行研究。因為每天的氣溫都不同，特別最近氣溫驟降或陡升。



圖 1-2 斜頂式溫室



圖 1-3 圓拱型溫室

參、研究目的與問題

所以我們以當時 15 分鐘內下降的溫度差÷溫室內最高溫。

一、山形的溫室屋頂：1.當溫室外有風，當窗口在開在屋頂，降溫效果如何？2.當溫室外有風，在開在屋頂高度 1/2 處開對窗，降溫效果如何？3.不同的屋頂角度是否影響降溫效果。

二、斜頂式的溫室屋頂：1.當溫室外有風，當窗口在開在屋頂，降溫效果如何？2.當溫室外有風，在開在屋頂高度 1/2 處開對窗，降溫效果如何？3.不同的屋頂角度是否影響降溫效果。

三、圓拱形的溫室屋頂：1.當溫室外有風，當窗口在開在屋頂，降溫效果如何？2.當溫室外有風，在開在屋頂高度 1/2 處開對窗，降溫效果如何？3.不同的屋頂弧度或高度是否影響降溫效果。

四、嘗試找出降溫效果好的溫室，探討其降溫效果佳的原因 1.溫室內部的熱空氣的流動情形為何。2.屋頂上方的風速是否有不同。

肆、研究架構、設備與器材

一.研究設備與器材：數位溫度計、相機、蚊香、打火機、電風扇與下表自製實驗工具與不同角度的屋頂

山形 90 度頂高 21cm	山形 120 度頂高 16cm	山形 150 度頂高 9cm	斜頂式 65 度頂高 21cm	斜頂式 70 度頂高 16cm	斜頂式 80 度頂高 9cm	圓拱形頂高 21cm
溫室主體長寬高各為 60cm、42cm、29cm	圓拱形頂高 16cm	圓拱形頂高 9cm	可愛小風車	包了綠色玻璃紙手電筒	測量溫室上下層的溫度	

圖 4-1 實驗裝置示意圖

二、實驗流程：



圖 4-2 外部風場測量示意圖

將數位溫度計放在上下四個角落，紀錄溫度。

以包了綠色玻璃紙的手電筒放至溫室內，觀察溫室內部煙流向與分布。每隔 5 分鐘紀錄溫度。

在溫室底部放置蚊香，點燃蚊香使溫室充滿煙並升溫 5 分鐘。

用小風扇測量屋頂上方 3 公分的轉數風速：使用可愛小風車，把一片扇葉塗上黑色，放至在定點之後使用錄影機拍攝轉動影片。

5 分鐘後記錄溫室內的溫度。打開溫室屋頂的開口(3cm*3cm)，以電風扇中的低速風距溫室 1m 的位置吹拂 15

使用 GOM Player 播放軟體進行慢速播放，計數固定時間內其轉動的圈數/秒數，定義為該風車轉速。

伍、研究結果與分析

一.不同型態溫室屋頂，不同的開窗位置在風扇最弱風速下的降溫情形

(一)山形屋頂 表 5-1-1：山形屋頂有風有開窗的降溫情形

屋頂高度	21cm (屋頂夾角 90 度)	16cm (屋頂夾角 120 度)	9cm (屋頂夾角 150 度)
降溫變化 (對開)			
降溫變化 (頂開)			

(二)斜頂式屋頂 表 5-1-2：斜頂式屋頂有風有開窗的降溫情形

屋頂角度	21cm (屋頂夾角 65 度)	16cm (屋頂夾角 70 度)	9cm (屋頂夾角 80 度)
降溫變化 (對開)			
降溫變化 (頂開)			

(三)圓拱形屋頂 表 5-1-3：圓拱型屋頂有風有開窗的降溫情形

屋頂高度	21cm	16cm	9cm
降溫變化 (對開)			
降溫變化 (頂開)			

由表 5-1-1~5-1-3 發現升溫 5 分鐘後，溫室上層溫度均比下層高，推測原因是點燃的蚊香加熱空氣，使熱空氣密度變小，對流到屋頂上層，因而上層溫度較下層高。當風扇以最弱風速吹拂時，所有的溫室上下層都開始降溫，並且 15 分鐘後，大部分的上層溫度下降幅度較大。

表 5-1-1 顯示:以對開而言，90 度和 150 度上層溫度 15 分鐘後都比下層溫度低、頂開則 120 和 150 度最後上下層溫度幾乎一致。

表 5-1-2 顯示:而且以對開而言，無論何種角度的屋頂上層溫度 15 分鐘後都比下層溫度低、頂開則最後上下層溫度幾乎一致。

表 5-1-3 顯示:頂高 21cm 無論是對開還是頂開，上層溫度都較下層溫度低。而頂高 9cm 的圓拱型溫室上下層溫度都趨近一致。

由以上的數據顯示，屋頂的角度和弧度會影響降溫情形。因為每天的氣溫都不同，早晚也不一樣。所以我們用降溫率來進一步分析。

二、不同型態溫室屋頂，不同的開窗位置在風扇最弱風速的降溫率

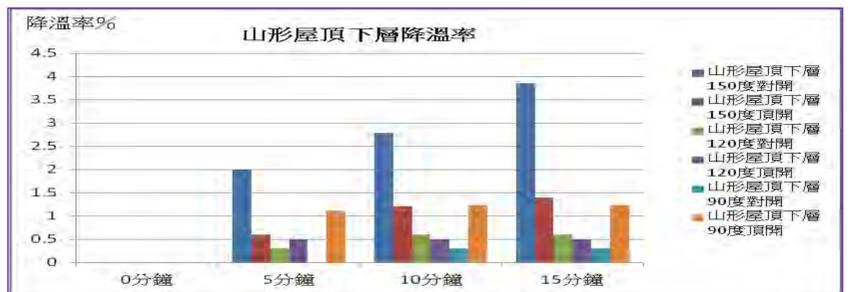
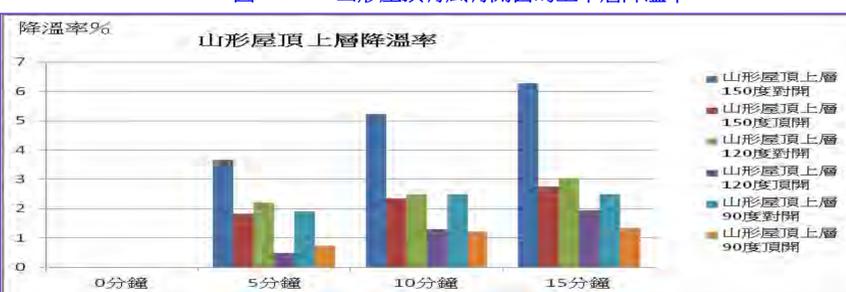
(一)山形屋頂 表 5-2-1-1：山形屋頂有風有開窗的降溫率

山形屋頂上層	降溫時間	降溫率				山形屋頂下層	降溫時間	降溫率			
		0 分鐘	5 分鐘	10 分鐘	15 分鐘			0 分鐘	5 分鐘	10 分鐘	15 分鐘
降溫率%	150 度對開	0.00	3.66	5.23	6.27	降溫率%	150 度對開	0.00	1.99	2.79	3.85
	150 度頂開	0.00	1.83	2.35	2.75		150 度頂開	0.00	0.60	1.20	1.39
	120 度對開	0.00	2.21	2.49	3.04		120 度對開	0.00	0.30	0.60	0.60
	120 度頂開	0.00	0.49	1.29	1.94		120 度頂開	0.00	0.49	0.49	0.49
	90 度對開	0.00	1.90	2.50	2.50		90 度對開	0.00	0.00	0.30	0.30
	90 度頂開	0.00	0.73	1.22	1.34		90 度頂開	0.00	1.11	1.24	1.24

表 5-2-1-2：山形屋頂有風有開窗的降溫率圖

屋頂高度	21cm (屋頂夾角 90 度)	16cm (屋頂夾角 120 度)	9cm (屋頂夾角 150 度)
降溫率 (對開)			
降溫率 (頂開)			

圖 5-2-1：山形屋頂有風有開窗的上下層降溫率



山形屋頂屋的頂高較低、屋頂角度越大，上層整體降溫率都比較好(150 度 > 120 度 > 90 度)。還有窗戶開在屋頂的位置似乎降溫效果不像開對窗來的好。下層整體降溫率 150 度優於其它角度。但是降溫率較上層低很多。

(二)斜頂式屋頂

表 5-2-2-1：斜頂式屋頂有風有開窗的降溫率

斜頂式屋頂上層	降溫時間	降溫率%				斜頂式屋頂下層	降溫時間	降溫率%			
		0分鐘	5分鐘	10分鐘	15分鐘			0分鐘	5分鐘	10分鐘	15分鐘
降溫率%	9cm 對開(80度)	0.00	1.10	1.54	1.54	降溫率%	9cm 對開(80度)	0.00	0.44	0.88	0.88
	9cm 頂開(80度)	0.00	1.86	2.30	2.41		9cm 頂開(80度)	0.00	0.77	1.43	1.65
	16cm 對開(70度)	0.00	1.08	2.97	3.24		16cm 對開(70度)	0.00	0.00	0.27	0.55
	16cm 頂開(70度)	0.00	1.33	1.86	1.86		16cm 頂開(70度)	0.00	0.00	0.27	0.54
	21cm 對開(65度)	0.00	1.10	1.38	1.38		21cm 對開(65度)	0.00	0.28	0.28	0.55
	21cm 頂開(65度)	0.00	0.80	1.88	1.88		21cm 頂開(65度)	0.00	0.00	0.27	0.27

圖 5-2-2-3：斜頂式屋頂有風有開窗上下層的降溫率

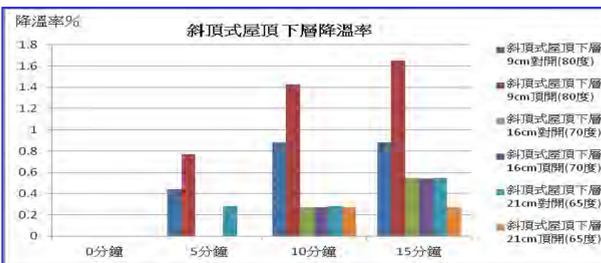
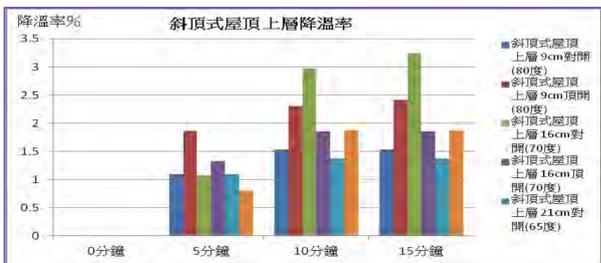
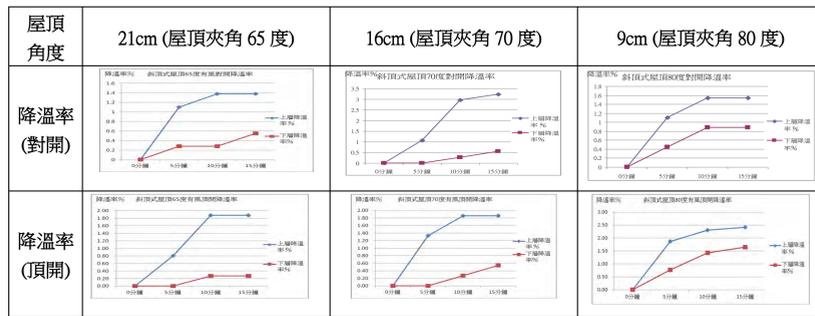


表 5-2-2-2：斜頂式屋頂有風有開窗的降溫率圖



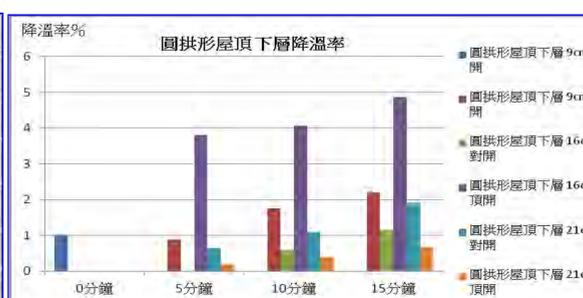
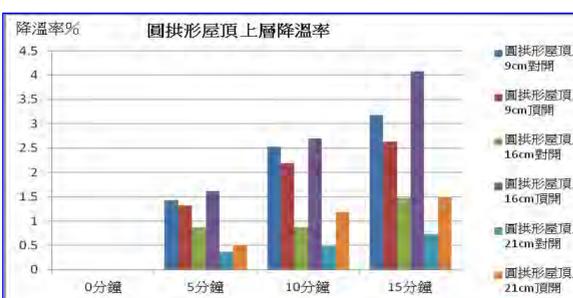
由表 5-2-2-1~3 中，不管是對開還是頂開，風扇吹風時間越久降溫率越好，而且上層降溫率都比下層高。但是頂高 9cm、屋頂角度大的（80 度）頂開時比對開上層的降溫率高些，但是在頂高 16cm 屋頂角度 70 度時，上層降溫率對開又比對開好。而頂高 21cm、屋頂角度 65 度，不管對開還是頂開，上層降溫率都很接近。反倒是下層除了頂高 9cm 屋頂角度 80 度 15 分鐘後的降溫率達 1.65% 之外，其它的都很低。

(三)圓拱形屋頂

表 5-2-3-1：圓拱型屋頂有風有開窗的降溫率

圓拱形屋頂上層	降溫時間	降溫率%				圓拱形屋頂下層	降溫時間	降溫率%			
		0分鐘	5分鐘	10分鐘	15分鐘			0分鐘	5分鐘	10分鐘	15分鐘
降溫率%	9cm 對開	0.00	1.43	2.52	3.18	降溫率%	9cm 對開	0.00	1.17	2.49	3.22
	9cm 頂開	0.00	1.32	2.19	2.63		9cm 頂開	0.00	0.88	1.76	2.20
	16cm 對開	0.00	0.88	0.88	1.47		16cm 對開	0.00	0.00	0.58	1.16
	16cm 頂開	0.00	1.62	2.70	4.08		16cm 頂開	0.00	3.80	4.08	4.86
	21cm 對開	0.00	0.37	0.49	0.74		21cm 對開	0.00	0.64	1.09	1.92
	21cm 頂開	0.00	0.51	1.19	1.50		21cm 頂開	0.00	0.20	0.39	0.67

圖 5-2-3-3：圓拱型屋頂有風有開窗上下層的降溫率圖



由表 5-2-3-1~3 圓拱形屋頂的降溫率，屋頂的弧高在 9cm 時，窗口對開上層和下層的降溫率十分相當；窗口頂開的時候上下層降溫率也很接近。雖然對開降溫率優於頂開，但是彼此降溫率差得不多。但是當弧高達 16cm 時，對開和頂開的差異更大，不論是上層還是下層，頂開的降溫率高過對開達 3 倍之多，而且頂開上下層的降溫率十分接近。當弧高到達 21cm 時，上下層的降溫率大幅下降，對開和頂開上下層降溫率正好相反。

三、各類型屋頂降溫率大小的比較

(一) 各類型屋頂的降溫率-最低降溫率的值

表 5-3-1 各類型屋頂的降溫率/最低降溫率的值

屋頂角度或高度	降溫率	倍數	屋頂角度或高度	降溫率	倍數
150 度對開	6.27	8.48	150 度對開	3.85	14.26
150 度頂開	2.75	3.72	150 度頂開	1.39	5.15
120 度對開	3.04	4.11	120 度對開	0.60	2.22
120 度頂開	1.94	2.62	120 度頂開	0.49	1.80
90 度對開	2.50	3.38	90 度對開	0.30	1.11
90 度頂開	1.34	1.82	90 度頂開	1.24	4.58
斜頂式屋頂上層	斜頂式屋頂下層				
9cm 對開(80度)	1.5	2.08	9cm 對開(80度)	0.9	3.27
9cm 頂開(80度)	2.4	3.26	9cm 頂開(80度)	1.7	6.11
16cm 對開(70度)	3.24	4.38	16cm 對開(70度)	0.55	2.04
16cm 頂開(70度)	1.86	2.51	16cm 頂開(70度)	0.54	2.00
21cm 對開(65度)	1.38	1.86	21cm 對開(65度)	0.55	2.04
21cm 頂開(65度)	1.88	2.54	21cm 頂開(65度)	0.27	1.00
圓拱形屋頂上層	圓拱形屋頂下層				
9cm 對開	3.18	4.30	9cm 對開	3.22	11.91
9cm 頂開	2.63	3.56	9cm 頂開	2.20	8.16
16cm 對開	1.47	1.99	16cm 對開	1.16	4.30
16cm 頂開	4.08	5.51	16cm 頂開	4.86	18.00
21cm 對開	0.74	1.00	21cm 對開	1.92	7.10
21cm 頂開	1.50	2.02	21cm 頂開	0.67	2.48

(二) 各種溫室分別以對開和頂開的平均降溫率比較

表 5-3-2-1 對開的各組比較

屋頂形狀與條件	平均降溫率
山形 150 度對開	5.06
圓拱形 9cm 對開	3.20
斜頂式 16cm 對開(70度)	1.90
山形 120 度對開	1.82
山形 90 度對開	1.40
圓拱形 21cm 對開	1.33
圓拱形 16cm 對開	1.32
斜頂式 9cm 對開(80度)	1.21
斜頂式 21cm 對開(65度)	0.97

表 5-3-2-2 頂開的各組比較

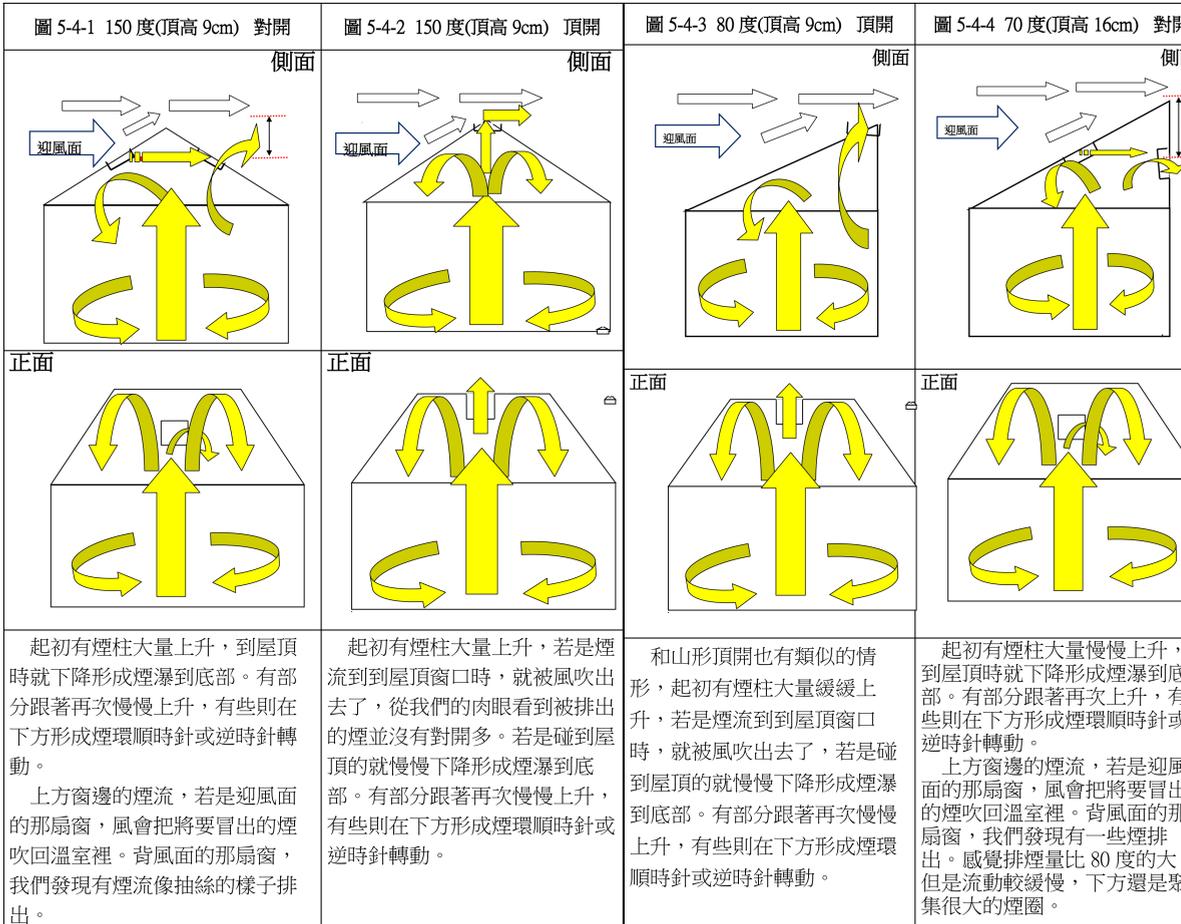
屋頂形狀與條件	平均降溫率
圓拱形 16cm 頂開	4.47
圓拱形 9cm 頂開	2.42
山形 150 度頂開	2.07
斜頂式 9cm 頂開(80度)	2.03
山形 90 度頂開	1.29
山形 120 度頂開	1.21
斜頂式 16cm 頂開(70度)	1.20
圓拱形 21cm 頂開	1.08
斜頂式 21cm 頂開(65度)	1.07

1.以對開的平均降溫率對開而言(1).山形：150 度(9cm) > 120 度(16cm) > 90 度(21cm) (2).斜頂式：70 度(16cm) > 80 度(9cm) > 65 度(21cm)(3).圓拱形：頂高 9cm > 21cm > 16cm 以上我們發現對開平均降溫率好的，多半是頂高較矮的溫室。我們懷疑是否和出風口和屋頂的水平氣流較接近。而且，頂高較矮的山型和斜頂式角度大，較平滑可能有助類似的伯努力效應產生。而圓拱形的屋頂比其他兩種更容易產生伯努力效應。
2.若以頂開降溫率而言：(1).山形：150 度(9cm) > 120 度(16cm) > 90 度(21cm) (2).斜頂式：80 度(9cm) > 70 度(16cm) > 65 度(21cm)(3).圓拱形：頂高 16cm > 9cm > 21cm 頂開降溫率好的，多半也是頂高較矮的溫室。且頂高較矮的山型和斜頂式角度大，較平滑可能有助於類似的伯努力效應產生。而圓拱形是頂高 16cm 的降溫率為最佳，21cm 最差。

四、不同形式的溫室屋頂在對開和頂開時溫室內部煙流走向的比較

(一)山形屋頂

(二)斜頂式屋頂



山形屋頂 150 度的上層的降溫率是所有屋頂中降溫率最好的，是圓拱形頂高 21cm 對開的 8.48 倍。其次是圓拱形頂高 16cm 頂開的 5.51 倍。下層降溫率則以圓拱形頂高 16cm 頂開為表現最優，是斜頂式屋頂 65 度(21cm)的 18 倍。其次是山形屋頂 150 度對開的 14.26 倍。

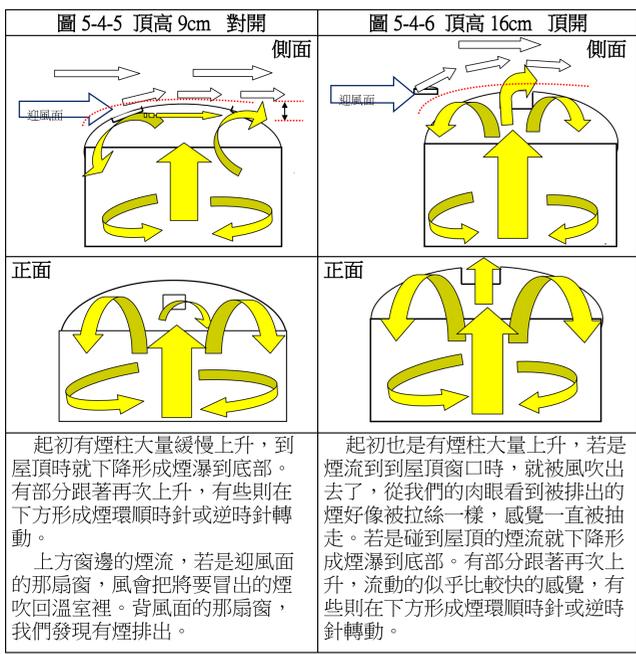
(三) 整體降溫率最佳的山形、斜頂式和圓拱形屋頂之比較

表 5-3-2 整體降溫率最佳的山形、斜頂式和圓拱形屋頂之比較

屋頂形式	上層降溫率	下層降溫率	平均降溫率	
山形屋頂	150 度對開	6.27	3.85	5.06
	150 度頂開	2.75	1.39	2.07
斜頂式屋頂	9cm 頂開(80度)	2.40	1.70	2.03
	16cm 對開(70度)	3.24	0.55	1.90
圓拱形屋頂	9cm 對開	3.18	3.22	3.20
	16cm 頂開	4.08	4.86	4.47

由以上的結果，我們發現整體降溫率最好的是山形對開，平均降溫率是 5.06%。其次是圓拱形頂高 16cm 頂開 4.47%。再來是圓拱形頂高 9cm 對開 3.20%。
我們十分好奇，為什麼會有這樣的結果，特別是山形 150 度對開上層的降溫率極佳，和下層差異很大，斜頂式 16cm 對開也是上下層差異大；又圓拱形 9cm 對開和 16cm 頂開上下層都很接近，且 16cm 頂開表現最為突出。
我們思考是否是因為風吹向屋頂時跟溫室的開窗位置有關，導致內部的熱流排出的快與慢。所以，我們就進一步探討，當溫室外有風吹，這幾個降溫率較好的溫室內部的氣流如何流動或排出。請看我們以下用蚊香的煙在溫室內流動模式的分析。

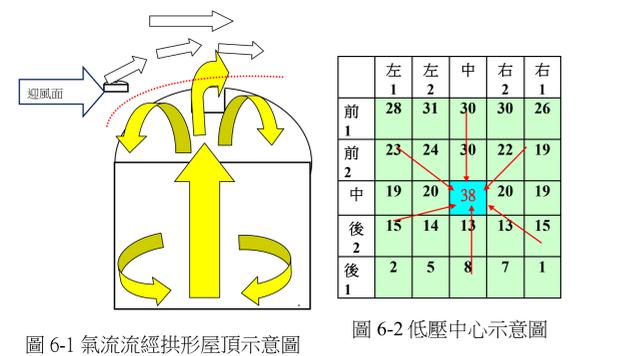
(三)圓拱型屋頂



起初有煙柱大量緩慢上升，到屋頂時就下降形成煙瀑到底部。有部份跟著再次上升，有些則在下方形成煙環順時針或逆時針轉動。
上方窗邊的煙流，若是迎風面的那扇窗，風會把將要冒出的煙吹回溫室裡。背風面的那扇窗，我們發現有煙排出。

我們發現對開窗的溫室，在兩扇窗口附近隱約有煙從迎風面的窗口流到背風面的窗口出去，山形 150 度的溫室比較明顯觀察，或許因為這兩扇窗口距離比較近，因此煙容易排出。所以我們認為這是山形和斜頂式對開窗的上層降溫率高於下層的原因。
圓拱型溫室 9cm 對開也有類似的現象，但是其和圓拱型 16cm 溫室呈現的是，上下層的降溫率趨近一致。我們推測可能受外面氣流滑過圓弧屋頂，產生類似伯努力效應的影響而造成的現象。
因此，我們想再進一步利用可愛小風車與慢速播放軟體來做屋頂風場的分析，來了解其中是否有因果關係。

陸、綜合討論



利用煙流模型和屋頂外面風場的分析來佐證我們提出的論點。所以以上的分析大致獲得以下的結論：

(一)山形屋頂

1. 屋頂角度越大，屋頂高度越矮，不管是對開窗還是頂開窗，它的平均降溫率比較好。上層降溫率比下層好，特別是對開窗的我們在觀察煙流的時候，也發現下層煙環較大，上層迎風面窗口的煙被吹回去，在背風面窗口流出來現象較明顯。用煙流模式(圖 5-4-1)推測，屋頂的平行風離背風面窗口很近，造成煙流很快被吸走，極有可能窗口間氣流互通造成，從風場分析(圖 5-5-1-1)得知迎風面和背風面窗口，風速較大。因屋頂角度大且平緩，可能有類似伯努力效應形成，造成它降溫效果佳。
2. 頂開窗的雖然上下層有差異，但差異沒這麼大，降溫率也較對開差。由煙流模式圖 5-4-2 我們覺得風扇的風沿屋簷向上爬升的氣流有阻礙屋頂上方的平行氣流，導致頂開窗的煙流變慢，影響降溫率。

(二)斜頂式屋頂

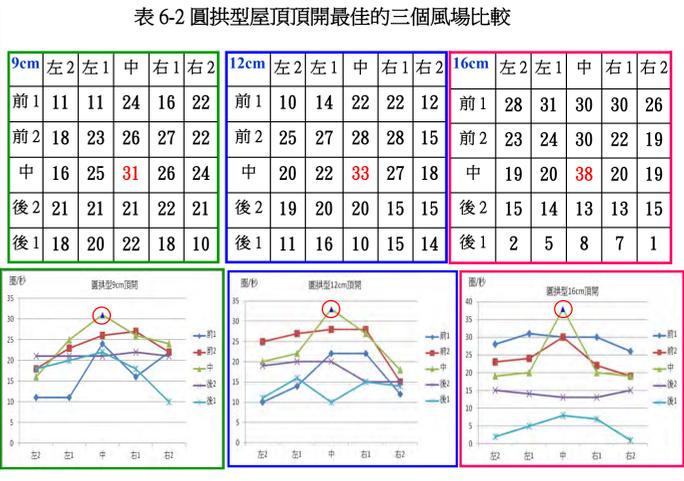
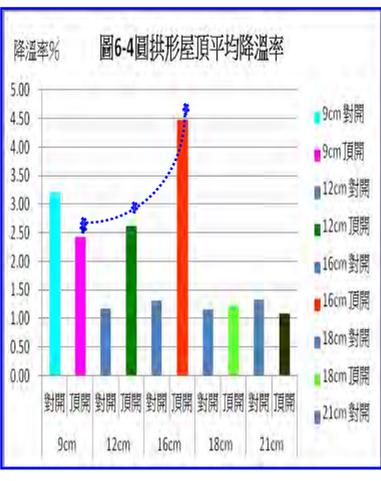
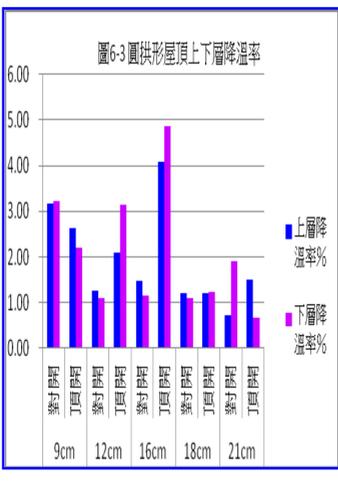
1. 我們發現斜頂式溫室在頂開的降溫率優於對開。特別是 80 度 9cm 頂高頂開的溫室降溫率和山形 150 度頂開的降溫率極為接近，我們推測這兩個溫室的迎風面角度相當，窗口位置相當。所以其降溫率十分接近。
2. 在 16cm 對開的上層降溫率表現不錯，由風場分析(圖 5-5-2-1)我們推測兩窗口互通所以窗口的溫度可能較低，但是下方上升的煙流若是離窗口較遠的，一樣形成煙瀑流到下層，使下層溫度仍偏高。頂高越高，就算是對開，開口也距離屋頂上方平行風較遠，煙流不易排出。

(三)圓拱形屋頂

1. 圓拱型的整體降溫效果很好，特別是在 16cm 頂開，上下層降溫率十分接近，伯努力原理的效應有發生，也就是圖 6-1 所示，當平行風滑過拱形屋頂時，其速率會變快，造成溫室兩前後有壓力差，也就是風扇轉速會增加，特別是中間頂端，果不其然頂端風速最大(圖 5-5-3-2)【轉速越快，表示前後氣壓差越大】。若是在最高點開天窗，更有助於溫室內的熱氣排出，即整個溫室內的氣流不是局部在動，是大部分藉由頂端排出而帶動氣流整個的擾動，慢慢可能可以趨近一致，所以我們可以推測，這是它在短時間內無法提供太多的降溫率的原因。而且上下層降溫率趨近一致對植物有利，因為我們植栽大多在地上，下層不宜太熱。
2. 頂高 9cm 對開降溫率為次好的，上層迎風面窗口的煙被吹回去，在背風面窗口流出來現象較明顯。我們用煙流模式(圖 5-4-5)推測，屋頂的平行風滑過屋頂，也會形成一個氣流，離背風面窗口很近，造成煙流很快被吸走，再加上，極有可能窗口間氣流互通造成，從風場分析(圖 5-5-1-1)得知迎風面和背風面窗口，風速較大。
3. 既然如此，我們一直在思考：只要是拱形屋頂就可以了嗎？所以進一步多做了頂高 12cm 和 18cm 屋頂對開和頂開的降溫率比對：

表 6-1 上下層 15 分鐘後降溫率

頂高	開窗位置	上層降溫率%	下層降溫率%	平均降溫率%
9cm	對開	3.18	3.22	3.20
	頂開	2.63	2.20	2.42
12cm	對開	1.26	1.10	1.18
	頂開	2.09	3.14	2.62
16cm	對開	1.47	1.16	1.32
	頂開	4.08	4.86	4.47
18cm	對開	1.20	1.10	1.15
	頂開	1.20	1.24	1.22
21cm	對開	0.74	1.92	1.33
	頂開	1.50	0.67	1.08



由以上實驗得知：不是弧長越長、頂高越高降溫就越好，也不是越低越好。頂高陸續下降到 12cm、9cm 頂開時平均降溫率和屋頂中央窗口的轉數也降，但是仍高過其它多數的不同型態的屋頂。若再下降高度也會使降溫率變差，因為沒甚麼弧度，所以溫室兩側壓力差更小。綜合以上，我們認為圓拱形屋頂 16cm 頂開上下層的降溫效果好，最值得開發利用。

柒、研究結論

- 綜合以上結果，我們的結論是：
- 一、有對開窗的溫室上層降溫率通常多於下層，也就是常發現下層降溫極慢，由煙環在下面緩慢移動，向上的煙柱也很慢。
 - 二、屋頂的角度較大或頂高較矮可能有利伯努力效應發生，可愛小風車的轉速測量屋頂上風速通常較快，也容易容易帶走溫室內的熱。
 - 三、各種屋頂的降溫率最好的比較：
 - (1).山形：150 度(9cm)對開 > 150 度(9cm)頂開
 - (2).斜頂式：80 度(9cm)頂開 > 70 度(16cm)對開
 - (3).圓拱型：頂高 16cm 頂開 > 9cm 對開
 頂高較矮、角度大的屋頂，降溫率較好。
 - 四、平均降溫率最好的是山形 150 度(9cm)對開，但是上下層差異大。圓拱型 16cm 頂開的平均降溫率，雖不若前者佳。但是上下層降溫率趨近一致。而且頂高較低的圓拱形屋頂，其降溫率都不錯
 - 五、山形、斜頂式、圓拱型三種比較：
 - (一) 平均降溫率最佳的三名是：山形 9cm 對開(5.06%)、圓拱型 16cm 頂開(4.47%)、圓拱型 9cm 對開(3.20%)
 - (二) 平均降溫率最差的三名是：斜頂式 21cm 對開(0.97%)、斜頂式 21cm 頂開(1.07%)、圓拱型 21cm 頂開(1.08%)。
 - (三) 上下層降溫率最一致的是圓拱型 16cm 頂開(4.47%)。

五、開窗位置之上方 3cm 平面之風場圖分析

我們在頂端開口位置 3 公分假想有一與底面積相同的平面，劃分為 25 格區域(開窗位置由紅色數字表示)，可愛小風車斜頂式屋頂轉速之數據整理測量每格的風速，其結果如下。轉速越快，表示兩側氣壓差越大

