

第十五屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA15-421

作品名稱：箏風相對_高雄風箏探空與天
氣系統之探討

姓名：黃展皇

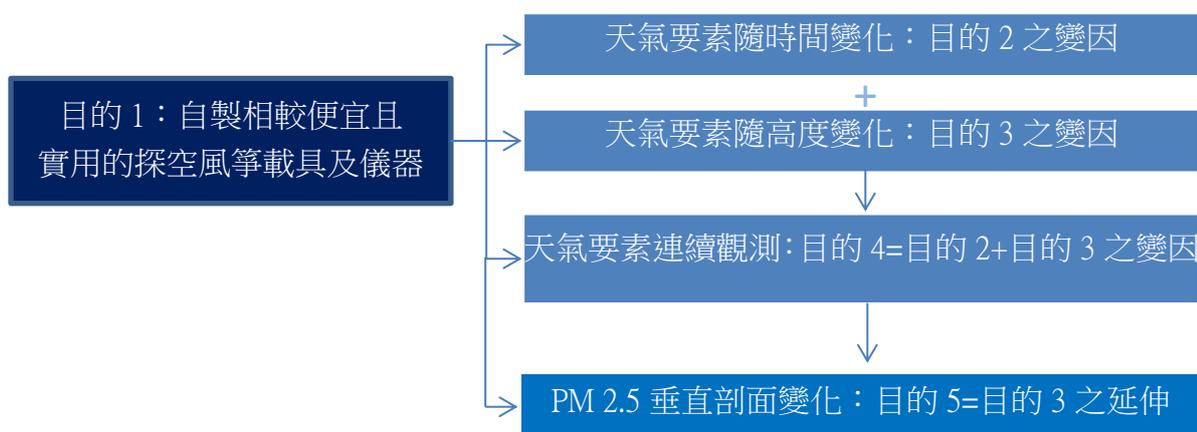
關鍵字：大氣邊界層、探空、絕對溼度

壹、研究動機：

大氣和人類的生活息息相關而且千變萬化，時時刻刻影響著我們，因此人類依據地面觀測站記錄各種天氣數據，包括風速、風向、溫度、溼度等等…以此作為分析天氣系統的基礎。隨著環保意識的興起，在 2012 年臺灣將 PM 2.5，也就是細懸浮微粒修法為第八項空氣污染物，研究者也紛紛投入實驗，使這個生活健康上的議題逐漸獲得重視。而在課堂上我們學習到氣象觀測中，一般使用探空氣球進行大氣垂直剖面的觀測，以得知大氣在垂直方向之情形，即可經過分析得知天氣詳細的趨勢。因此，我們對於探空觀測產生了興趣，但是探空氣球設備昂貴，且每次施放後儀器也無法回收再利用，不是我們高中生所能負擔的，再加上分析了幾筆板橋探空測站探空氣球的資料後發現，探空氣球在大氣層高度 1 公里以下的資料僅有 4 至 5 筆，無法詮釋我們感興趣的近地面大氣狀態，更遑論詳細解析資料了。為了滿足我們對近地面層大氣的好奇，我們曾向輔英科技大學環境工程學系商談繫留氣球探空的事宜，然而繫留氣球仍有價格昂貴的缺點，且無法於高風速場域施放。因此我們嘗試自行改裝風箏作為載具，將儀器如溫溼度氣壓儀、風速計以及空氣品質監測計進行改裝後搭載於風箏上，嘗試利用自製的探空設備及儀器進行近地面大氣探測。

貳、研究目的：

- (一) 藉由所學知識及有限資源自製較便宜且實用的探空風箏載具及儀器改裝。
- (二) 藉由地面觀測，分析溫度、溼度、風速、氣壓等氣象要素隨時間的變化。
- (三) 藉由風箏探空載掛觀測儀器，分析邊界層中溫度、溼度、風速、氣壓等氣象要素的垂直剖面變化。
- (四) 藉由風箏探空載掛觀測儀器，連續觀測分析一段時間中，邊界層中大氣各項天氣要素垂直剖面隨時間之變化。
- (五) 將以上結果歸納，了解邊界層特性後即以此為基礎觀察近地面細懸浮粒子濃度變化。



表一 研究目的流程及關係表

參、研究過程：

(一) 先備觀念：對流層與大氣邊界層之特徵：

根據**大氣科學**（戚啟勳 編著），對流層的主要特徵包含下列五點：

- 1.溫度近乎向上均勻遞減。
- 2.風速從地面向上增大。
- 3.下層有豐富的水分。
- 4.空氣有顯著的垂直運動。
- 5.大氣中天氣現象幾乎集中在此層。

水氣是造成天氣變化的主因。大氣中水氣含量約占 0~4%，且主要集中在對流層中，所以天氣現象幾乎集中在此層。但對流層中水氣的分布，會受到天氣系統、時間、地點、環境的不同，而有極大的差別。

對流層中最接近地表範圍的氣流運動會受到地表影響，稱為大氣邊界層。

Blumental (Cited by Hidy, 2000) 將大氣邊界層區分為三個不同的層次，在 0~400 公尺為地表邊界層、400~1000 公尺為過度層、1000 公尺以上為大尺度天氣系統範圍。Seibert et al. (2000) 提出若把大氣邊界層定義為緊鄰地面紊流主控的高度範圍，混合層則與大氣邊界層是相同意義的。

混合層高度在不同時間、不同地點均有所不同，如圖 1。導致混合層高度改變的因素包括太陽輻射引起的對流作用以及大氣平流作用。一般在晴朗的夜晚，混合層高度較低，僅約數十公尺高，清晨日出之後，由於太陽輻射增強，使大氣對流運動逐漸增強，造成混合層高度會逐漸增加，至午後垂直運動最旺盛時，混合層高度可能發展至 1~2 公里。

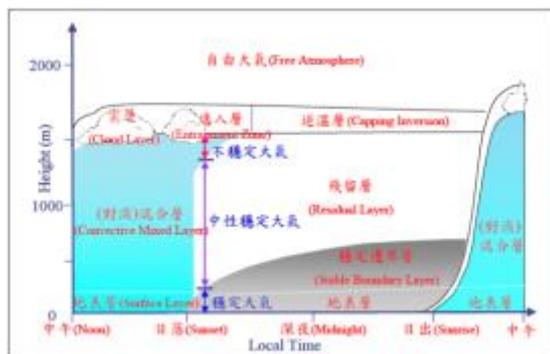


圖 1 混合層之日變化時序圖 (Stull, 1988)

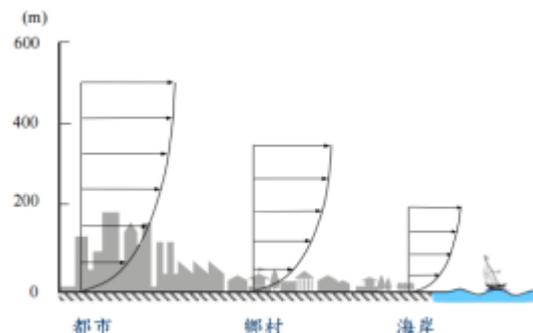


圖 2 大氣邊界層流特性

(摘自 中興大學土木系 朱佳仁 教授 編著講義)

(二) 研究步驟

1.要達成利用風箏成為探空載具的目的，我們必須克服數個問題：

<問題一>：風箏組要從何取得？什麼樣的風箏組才符合探空的需求？

解決辦法一：客觀條件下只要風箏提供的升力夠大、風箏線之長度夠長、抗拉力夠強，即可成為理想的探空風箏組。風箏組相較探空氣球容易取得的多，只需要利

用網路下訂即可購買到風箏組（圖 3）；然而為了貫徹「利用有限資源自製相較便宜的探空風箏載具」的中心想法，我們請職業為鐵工技師的舅舅仿造市面之捲線器形式製作金屬製大型捲線器，並採購風箏及風箏線，將三者組合成為一風箏組（線長 800m，抗拉力 150 磅），共費約 3500 元，相較於造價百萬的繫留氣球相對便宜許多，成為可實際廣泛使用的探空風箏組。



圖 3 風箏組



圖 4 氣溫溼度氣壓儀、風速計及空氣品質監測計

<問題二>：探空資料要如何取得並儲存？儀器要經過何種改裝才可以減輕重量並增加使用時間？要如何加裝使儀器可載掛於風箏上的外掛裝置？

解決辦法二：如圖 5 是最初的草案想法，即利用吊籠式平台固定儀器，利用輕型手機拍攝儀器數據以取得資料。圖 6 為施工過程。經過數次修改如下：

(1) 購置新式儀器：我們購置邁多科技 AM4214SD 熱線型風速計（精確度：風速 $\pm 5\%$ 讀取值、風溫 $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ ）、邁多科技 MHB-382SD 型氣溫溼度氣壓儀（精確度：氣壓 $\pm 2\text{hpa}$ 、氣溫 $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ 、相對溼度 $\pm 4\%$ 讀取值）、泰仕電子 TES-5322 型空氣品質監測計（精確度：PM 2.5 為 $1\text{mg}/\text{m}^3$ ）如圖（四），皆屬於較高精度高解析之觀測儀器，而這也是本實驗中成本支出較高的部分（共費約三萬四千元）。前兩者其數據可儲存至記憶卡，方便取出運用分析；而空氣品質監測計則是儲存於內建記憶體，須以驅動程式開啟唯讀檔，經由學校資訊老師協助後取得的 C 語言轉換為 excel 檔案加以分析。

(2) 備置儀器後將儀器沉重的乾電池替換為能量密度更高的鋰電池，即可減輕儀器重量並加強續航時間，有利實驗進行。本步驟為儀器改裝中最重要也耗時最久的部分，原因是找到電壓足夠、輕量化、續航力又足夠我們實驗時間的電池確實有難度。我們嘗試了 9V 電池、水銀電池、手機鋰電池等……許多種電池，最後在電池專家的建議下採用特殊型號的鋰電池串聯才成功改裝儀器的供電部分。

(3) 利用白鐵自製線夾勾以夾緊風箏線，再用魔鬼氈穿過線夾勾，並將儀器包覆在牢固的魔鬼氈內即可完成儀器的掛載。如圖 7 即為最終成果之實際應用。

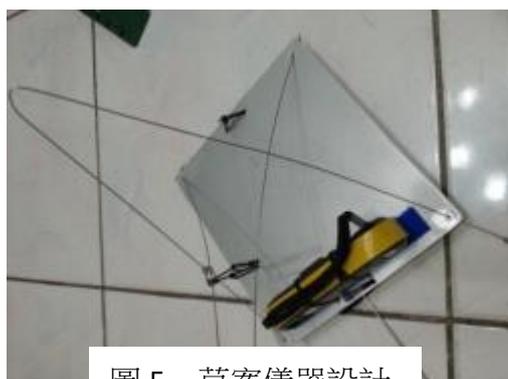


圖 5 草案儀器設計



圖 6 儀器改裝過程

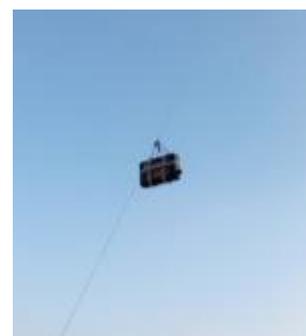


圖 7 儀器成果測試

<問題三>：風箏探空有何限制？如何補足？

解決辦法三：風箏探空有以下優點：可於高風速場域施放、可因應不同風速替換適合的風箏、造價相較便宜、多元應用性高…然而風箏探空的缺點是：負載重量有所限制、無法在非空曠場所或是完全無風之處施放。解決方法可如同前述所說盡量減輕儀器重量，並在不失一般性的短時間內（不超過一小時）分別施放不同儀器以取得資料；在不同的時間及空間進行觀測，例如在不失一般性的情形下可以尋找其他適當的觀測地點，或是以長期大量觀測得到豐富的資料並加以推測。

<問題四>：本研究為探空觀測，高度這個變因是相當重要的，我們如何獲得正確精準的高度數據？

解決辦法四：由於本研究購置之儀器本身不是被設計為探空專用，因此並沒有高度計的功能，而這也曾經困擾過我們。然而我們查閱參考文獻後發現氣壓是高度的嚴格單調函數，又儀器有氣壓計的功能，理應是可以藉由一連串的參數運算而將氣壓轉換為高度的，因此我們嘗試以氣壓和我們測得之氣象參數經過公式推算出高度，如此即可掛置一氣象儀器而得多項資料，收事半功倍之效；然而我們推導出一理論公式後，必須先行確定此公式之正確性，因此我們佐以 GPS 定位高度及多重比對氣象局資料，一方面確定本高度換算公式是正確的，另一方面可得多重數據（如 GPS 高度數據），有利於進一步加以研究。

依據氣象學中大氣靜力平衡的理論，可利用地面與高空的氣壓差，推算出高度。由理想氣體方程式（1）式及大氣靜力平衡方程式（2）式

$$PV = nRT \quad (1) \text{ 式}$$

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \quad (2) \text{ 式}$$

經由 $n = \frac{m}{M}$ ， m 為質量、 M 為分子量

$$\rho = \frac{m}{V} \quad , \rho \text{ 為密度、} V \text{ 為體積}$$

代換得 $\rho = \frac{PM}{RT}$ ，合併代入（1）式

得 $dZ = -\frac{RTdP}{MgP}$ ，再合併常數 R 和 M 得 R_d

上式可表示為 $dZ = - (R_d * T/G) * (dP/P)$

以積分方式作數值運算得：

$$Z_1 - Z_2 = - \left(R_d * \frac{T}{G} \right) * [\ln(P_1) - \ln(P_2)] \quad (3) \text{ 式}$$

其中 Z_1 及 Z_2 為兩高度層

R_a 為大氣常數（其值經推算為 287）

T 為該段高度層之平均溫度

P_1 及 P_2 為兩高度之氣壓值

G 為重力加速度。

利用（3）式運算，採用逐層累加法可得到觀測數據之高度值，如圖 8 即為風箏探空實測公式高度對數據量的作圖。

我們實驗得到高度數據之際，同步掛載 GPS 以得到 GPS 高度數據，並進行兩者比對，以確定公式高度與 GPS 之高度的差異。而比對的項目以兩項為準：

- 一、公式最大高度與 GPS 之最大高度誤差值。
- 二、公式高度對時間作圖與 GPS 之高度對時間作圖之吻合度。

我們之所以採用此兩項目作為準確性指標，是因為若公式有累加性（如：未用逐層累加法）或根本性（如：公式錯誤或不適用）的問題，其結果就會是探空最大高度產生最大誤差，因此最大高度乃是驗證公式正確性的最佳試驗資料。然而為了避免其他誤差，我們可以將公式高度對時間作圖，將參考高度基礎值及時間步場排版相同，即可得到公式高度曲線以比對 GPS 高度曲線，若有誤差即可在曲線比對中看出。其結果如下：

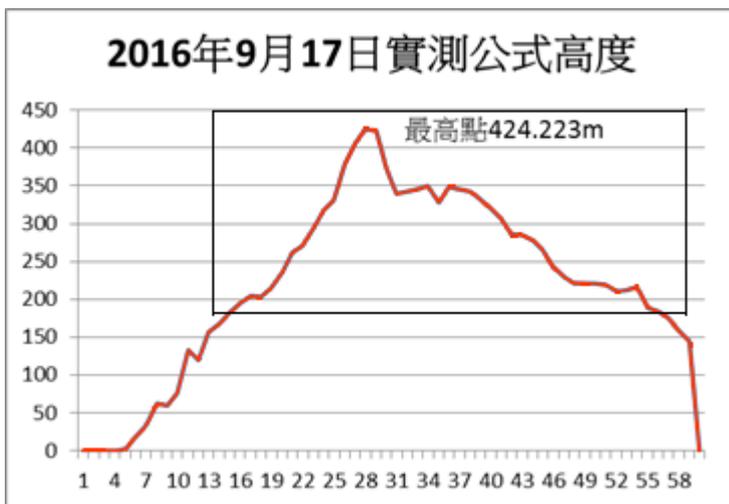


圖 8 公式高度實測



圖 9 GPS 高度實測及疊圖分析

圖 8 橫坐標為 30 秒一筆資料的時間步長(time-step)，縱坐標為高度（公尺）。受限於 GPS 設定，高度基準值非零而為 181m，因此我們將公式高度選取 181m 作圖後將資料時間步長同步並疊圖分析如圖 9：GPS 圖中綠色面積為 GPS 高度曲線，紅線為公式高度作圖而得，經過觀察可發現兩者曲線接近一致；而 GPS 最高高度 421m，和公式高度最高點 424m 僅相差 3m，扣除兩儀器之間高度差 1m 可發現兩者差距比為 $\frac{424-421-1}{(1/2)(424+421)}=0.47\%$ ，為極小之差距，可證明 GPS 高度支持公式準確性，並排除公式準確性問題。

接著我們開始注意儀器準確性問題，而驗證方法是我們可以將本實驗儀器與其他精準儀器做同時的數據比對以確定儀器之實效，甚或是和其他精準儀器進行同時間同場域之觀測並加以驗證：因此我們決定與輔英環工系合作檢驗儀器，而儀器數據準確度亦和輔英環工系方面（輔英環工系儀器：VISALA 公司 TS-111 Tethersonde 氣象儀）一致，成功解決儀器準確性問題。



最後我們將氣象局 2014 年 11 月 1 日板橋探空所得數據代入此高度公式，並和基準點也跟我們一樣為零的氣象局高度對比驗證其正確性，如圖 10：

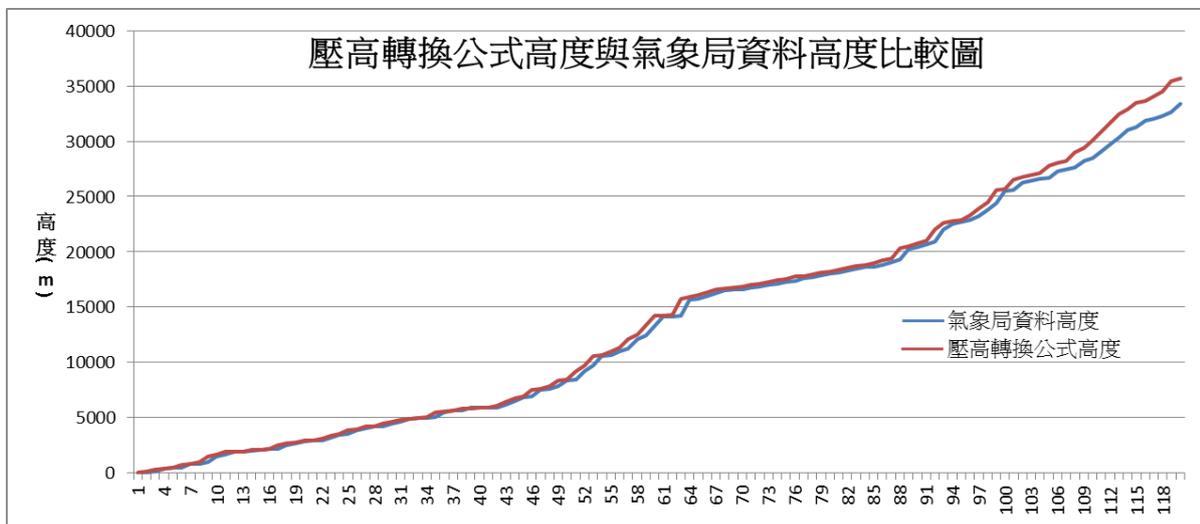


圖 10 公式高度與氣象局高度比對圖

其結果在 5 公里下誤差小於 1%，準確性相當高，尤其在低層大氣時兩折線幾乎完全一致，而在約三十公里處漸產生差異，表示本公式至少可適用於高度約十公里的對流層，而高度僅一公里的邊界層在氣象要素隨高度之非線性變化更小，因此在邊界層套用本公式以計算高度是經濟、合理且準確的選擇。我們已排除公式準確性問題、儀器準確性問題及局部個案問題。本公式確定可行。

我們經由一連串的推導、實驗、蒐證、確認，最終可以排除公式準確性問題、儀器準確性問題、局部個案問題等影響實驗的因素，得到確定正確無誤的研究基礎。（利用本式運算，並採用準確的逐層累加法可得到觀測數據之高度值。其準確性於低層大氣可媲美氣象局及研究單位。）

2.要進行近地面大氣的觀測，首要之務就是要找到不受到周圍地形或建築物干擾的觀測地點，以求觀測結果符合真實大氣狀態。這樣的地點在市區中幾乎是絕跡，唯一勉強還能符

合前述條件的地點，在高雄捷運橘線鳳山西站旁，有一塊廣大的空地，其地理位置（東經 120°20'53.99"，北緯 22°37'31.22"）如圖 11，我們選定此處作為觀測基地，圖 12 為觀測基地周圍環景圖。



圖 11 觀測基地



圖 12 觀測基地 360 度環景圖

- 3.使用溫溼度氣壓儀、風速計以及空氣品質監測計進行地面觀測。
- 4.使用前述風箏組分別掛載溫溼度氣壓儀、風速計以及空氣品質監測計，並配合風場施放風箏，進行近地面大氣探空觀測。
- 5.觀測數據分析，並使用數學公式運算得到參數，詳見附錄
（附錄一：實驗數據處理；附錄二：絕對溼度推導；附錄三：風速計高度資料推算；附錄四：實驗相片）

（三）研究案例

我們的研究自從 2015 年 11 月即著手進行觀測，因此有著大量的研究數據。而經過數據分析整理後，以下是最具結果代表性的觀測事件。我們於下列時段進行各項天氣觀測：

| 項目 | 日期 | 時間 |
|-------------------|----------------------------------|---------------|
| 案例一 地面觀測 | 2016 年 1 月 30 日 | 11：30 至 21：30 |
| 案例二 風箏觀測 | 2016 年 2 月 19 日 | 12：48 至 14：20 |
| 案例三 地面觀測 與 風箏觀測 | 2016 年 3 月 5 日 至 2016 年 3 月 10 日 | 14：00 至 15：30 |
| 案例四 風箏觀測 (PM 2.5) | 2016 年 9 月 17 日 | 16：20 至 17：10 |

表二 觀測項目與時間明細

1.案例一，2016年1月30日11:30至21:30，進行地面觀測。

(1) 天氣概況：此日為冷鋒過境後的天氣型態，台灣的天氣受蒙古大陸高壓影響，風向以北風至東北風為主。



圖 13 (a)

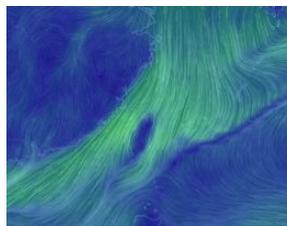


圖 13 (b)

2016年1月30日 地面天氣圖

2016年1月30日 地面風場圖

(2) 觀測結果：

圖 14 (a) (b) (c) (d) 分別為案例一氣溫、相對溼度、氣壓、風速觀測結果。

圖 14 (a) 溫度資料顯示，白天的平均溫度為 24.68°C，但溫度起伏大，當天最熱的一小時中，高低溫差達 2°C。入夜後，溫度一路下滑至 19°C，且溫度無明顯起伏。

圖 14 (b) 相對溼度資料顯示，白天的相對溼度值在 75%以下，最低值 57.9%發生在 13 點 35 分。午後，相對溼度值逐漸上升，至夜晚 21 時，相對溼度高達 85%。

圖 14 (c) 為氣壓資料，在觀測時間內，氣壓呈現平滑的起伏變動，主要是受大氣潮汐的影響，大致上當天之氣壓值在考慮大氣潮汐變化，通常上下起伏不超過 1.2hPa，並無特別突出之值發生。

圖 14 (d) 為風速資料，當天台灣天氣系統為鋒後冷區，是為東北季風風場。而在觀測中風速並未有明顯變動，白天平均風速為 1.53 m/s，只有在 5 點時風速有些許增加，夜晚平均風速為 2.31 m/s。

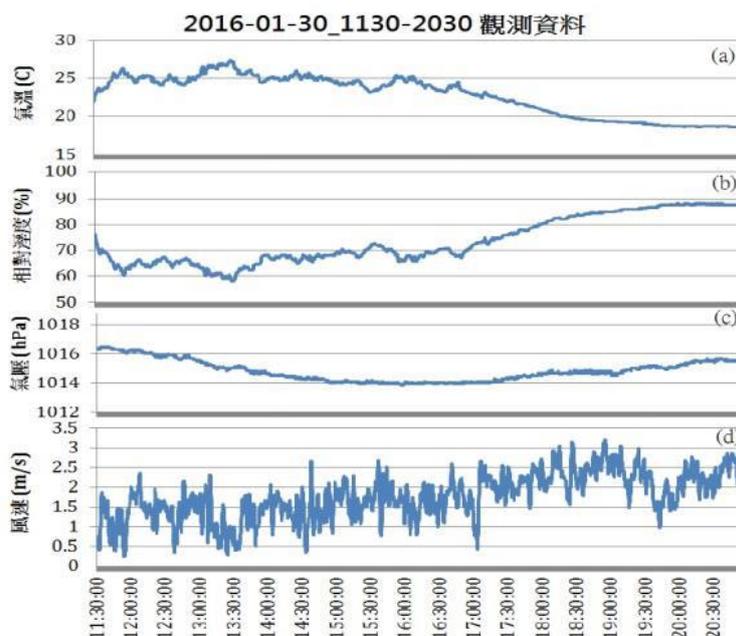


圖 14 2016年1月30日觀測資料 (a) 氣溫；(b) 相對溼度；(c) 氣壓；(d) 風速

白天溫度起伏大且氣溫零星起伏大，小時溫差可達 2°C。入夜後，溫度一路下滑至 19°C，且溫度無明顯起伏。推測是由於太陽輻射、雲量變化、風場交互作用的結果。若某段時間中，若雲量增加、風速增強，會造成局部時間的降溫作用，而太陽輻射增強時加溫近地表空氣，則氣溫會升高，氣溫日變化和輻射加熱及冷卻有關。

案例一白天的相對濕度值在 75%以下。午後相對濕度值逐漸上升，夜晚時相對濕度為全天最高。考慮絕對水氣的變化，其結果如圖 15。在觀測的時間期間大氣中實際水氣含量約為 0.01465 kg/m³，水氣量變化率約 13%，最高值發生在 14 點 47 分，最低值為 21 點 18 分，分析結果顯示，隨著溫度的下降，夜晚大氣中實際水氣含量是略降的。

我們將氣溫與相對濕度做散佈圖，其結果如圖 16，可以發現氣溫與相對濕度呈現高度負相關，相關係數 R=0.9947，為極高的負相關性。綜合以上結果顯示，夜晚相對濕度的增加的現象，主要是由於氣溫下降，使空氣的飽和水氣壓降低，導致相對濕度升高。

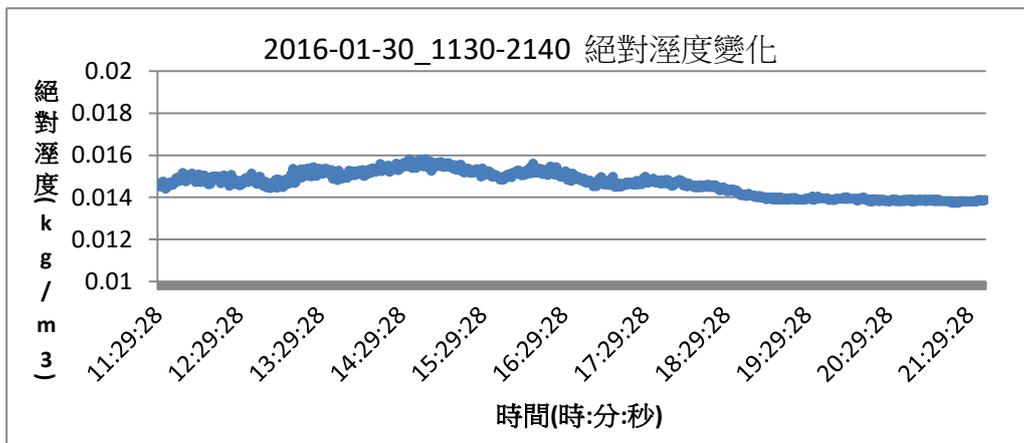


圖 15 2016 年 1 月 30 日絕對溼度變化

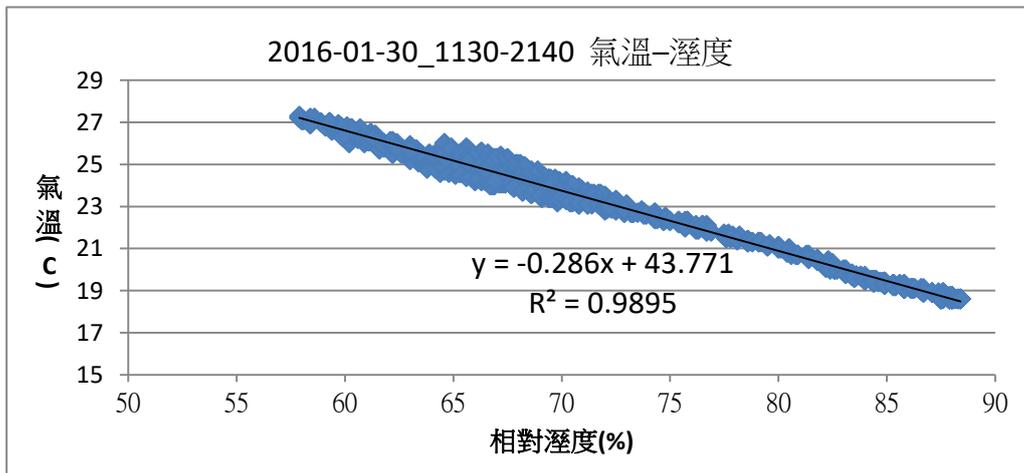


圖 16 氣溫與相對溼度關係圖

2.案例二，2016 年 2 月 19 日 12：48 至 14：20，進行風箏觀測。

(1) 天氣概況：此日為晴朗的天氣型態，台灣的天氣受出海高壓及蒙古高壓影響，高雄的風向以西風為主。

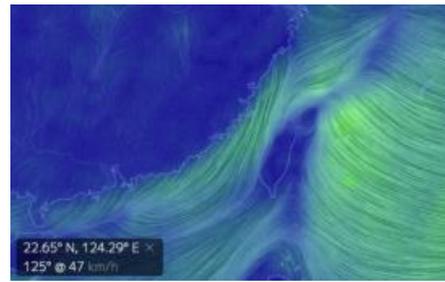
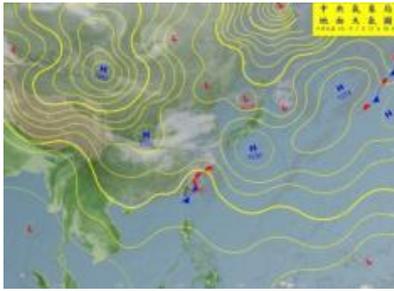


圖 17 (a) 2016 年 2 月 19 日 地面天氣圖； (b) 2016 年 2 月 19 日 地面風場圖

(2) 觀測結果：

圖 18 (a) (b) (c) (d) 分別為案例二氣溫、相對溼度、氣壓、風速觀測結果。

從圖 18 (a) 溫度資料顯示，地面溫度為 31°C，且高度越高則溫度越低。

從圖 18 (b) 相對溼度資料顯示，地面相對溼度為 57% 且為探空最低值，高度越高則相對溼度越高。

從圖 18 (c) 為氣壓資料，可明顯看出高度和氣壓的極高度負相關：高度越高則氣壓越低，呈現明顯線性關係。

從圖 18 (d) 為風速資料，當天台灣天氣系統正處於兩高壓帶來的不同風場之間。因風速計能記錄溫度與風速大小，且溫度隨高度降低，所以我們以溫度為垂直座標並將數值反轉作圖，觀測中各高度風速並未有明顯趨勢而皆為 0 到 4m/s 的陣風，較高空的風速大約集中於 2 ~ 4 m/s，2 m/s 以下風速較少。

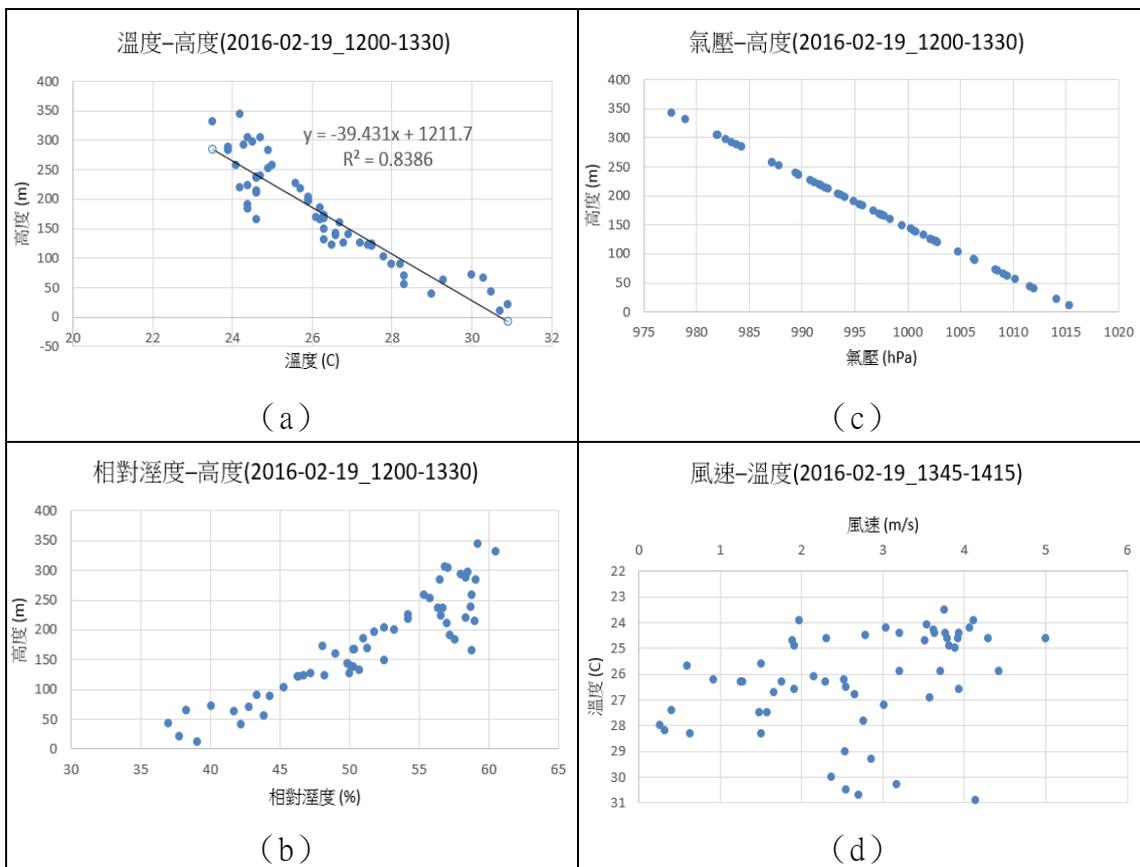


圖 18 2016 年 2 月 19 日觀測資料 (a) 氣溫；(b) 相對溼度；(c) 氣壓；(d) 風速

案例二資料顯示：高度越高則氣溫越低；相對溼度隨高度增加而上升，考慮氣溫和相對溼度之關係，將探空資料做絕對溼度變化圖後可以排除水氣進出於觀測的影響，再次證明氣溫和相對溼度之負相關；氣壓在地面不會有劇烈變動，但與高度呈現良好的線性變化以及極高負相關；風速在地面因為地表摩擦力及擾流而常會出現陣風，在垂直變化上，地表附近最低風速常小於 1m/s，隨著高度的增加，風速最大值會隨之提升。

3.案例三，2016 年 3 月 5 日至 10 日，每日下午進行風箏觀測。

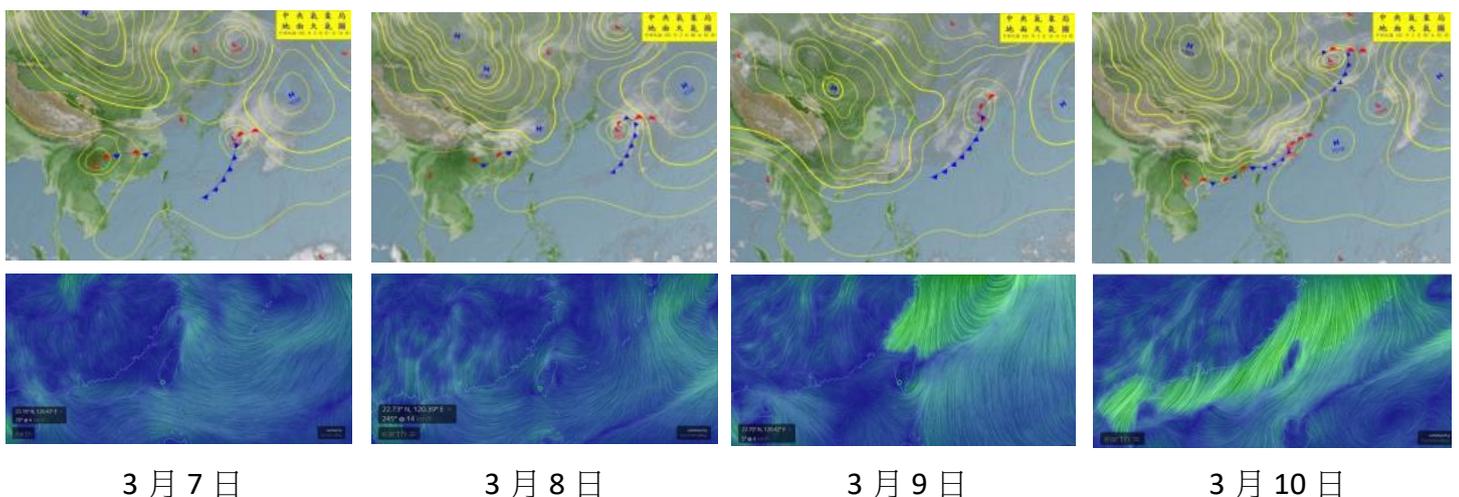
(1) 天氣概況：

依據中央氣象局 2016 年 3 月 4 日一周預報內容得知，3 月 9 日起將有鋒面通過及大陸冷氣團南下，全台氣溫將逐漸下降。臺灣中部以北及東北部地區轉為有短暫陣雨的天氣，東部、東南部地區及澎湖亦轉為有局部短暫陣雨的天氣，金門及馬祖有短暫陣雨或雷雨，南部地區為多雲。中央氣象局 2016 年 3 月 4 日一周預報內容如圖 19。

我們希望能夠從 3 月 5 日起至 3 月 12 日，追蹤此波鋒面及大陸冷氣團對高雄地區近地面層大氣的影響，但是由於 11、12 日高雄近地面風速都不大，風箏施放不成功，所以僅觀測到 3 月 5 日至 3 月 10 日的資料。其天氣圖及風場圖如圖 20。



圖 19 中央氣象局 2016 年 3 月 4 日一周預報內容



3 月 7 日

3 月 8 日

3 月 9 日

3 月 10 日

圖 20 2016 年 3 月 7 日至 10 日地面天氣及風場圖

圖 21 (a) 和 (b) 分別為 3 月 5 日至 3 月 10 日高雄測站氣壓及氣溫連續變化，圖中紅色小箭頭指示點為施放風箏觀測時間。而從圖 21 (a) 我們可以發現高雄的氣壓變化有周期約為一天的半日潮循環變化及長周期的氣壓變動，可以證明案例一中的氣壓變化是為大氣潮汐所影響，且隨著天氣系統也會有長周期的氣壓改變；圖 21 (b) 則顯示氣溫變化也有周期為一天的起伏及長周期的氣溫變動，隨著天氣系統也會有長周期的氣溫改變，在日變化中清晨溫度為最低。



圖 21 (a) 2016 年 3 月 5 日至 10 日氣壓連續變化



圖 21 (b) 2016 年 3 月 5 日至 10 日氣溫連續變化
(氣壓與氣溫資料來源：中央氣象局)

(2) 觀測結果

圖 22 (a) (b) (c) (d) 分別為 3 月 5 日氣溫、相對溼度、氣壓、風速觀測結果。3 月 5 日 15 點 30 分，地表氣壓值為 1011 hPa，地表氣溫為 26.5°C。依大氣靜力方程式推算，本日測得最大高度為 304.2 公尺，高空最低氣壓值 977.5 hPa、最低氣溫 23°C。氣溫與氣壓均隨高度增加而下降，氣壓遞減率為 11.440hPa/100m，氣溫遞減率為 1.038°C/100m。

在可測量的大氣範圍中，相對溼度約在 60% ~ 70%之間變化，地表至 100 公尺高度中，相對溼度隨高度增加而上升；高度 100 公尺以上至 300 公尺之間，相對溼度則隨高度增加而下降。

由風速資料顯示，地表至 300 公尺高空均呈間歇性陣風，陣風最大風速隨高度增加而加快。

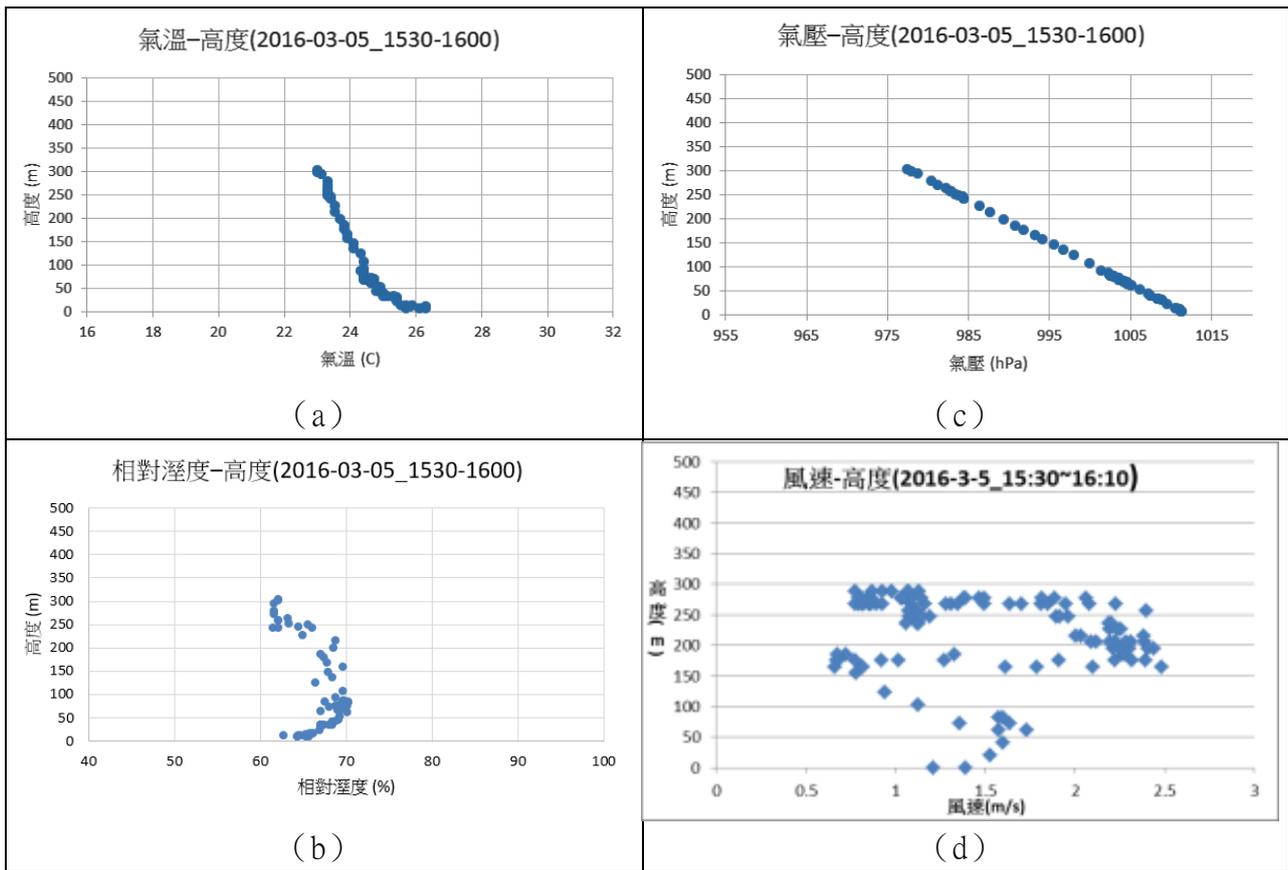


圖 22 2016 年 3 月 5 日觀測資料(a)氣溫；(b)相對溼度；(c)氣壓；(d)風速

由案例一的觀測結果得知，相對溼度值會受氣溫變動而改變，不容易直接由相對溼度大小判斷大氣中實際水氣含量，我們再經由觀測資料計算得出實際水氣量隨高度變化圖如圖 23。

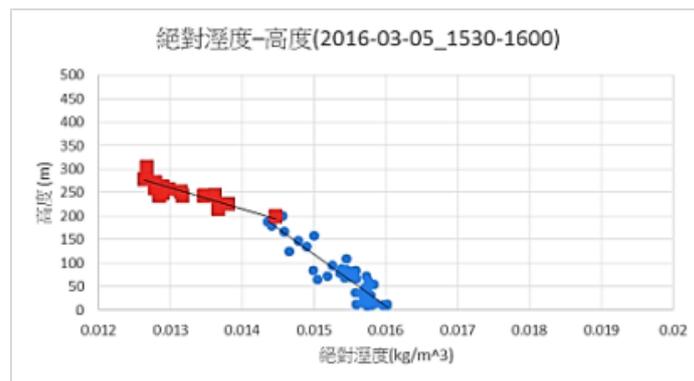


圖 23 2016 年 3 月 5 日絕對溼度與高度關係圖

在絕對溼度方面，地面為 0.016 kg/m^3 ，隨著高度增加及溫度下降，絕對溼度相應減少，約地表至 200 公尺高度，絕對溼度的遞減率為 0.0008 kg/m^3 每 100m（藍點區）；然而在約 200 公尺以上，絕對溼度的遞減率增加為 0.0025 kg/m^3 每 100m（紅點區），表示了約 200 公尺高度處為一分界線，區分了上下兩種不同的空氣特質。

圖 24 (a) (b) (c) (d) 分別為 3 月 6 日氣溫、相對溼度、氣壓、風速觀測結果。3 月 6 日 15 點 00 分，地表氣壓值為 1011 hPa，地表氣溫為 29.5°C。依大氣靜力方程式推算，本日測得最大高度為 460.8 公尺，高空最低氣壓值 960.3 hPa、最低氣溫 23.1°C。氣溫與氣壓均隨高度增加而下降，氣壓遞減率為 11.270hPa/100m，氣溫遞減率為 1.377°C/100m。

在可測量的大氣範圍中，相對溼度約在 40% ~ 60%之間變化，地表至 400 公尺高度中，相對溼度隨高度增加而上升，高度約 400 公尺處相對濕度達最大值 58.3%；高度 400 公尺以上至 450 公尺之間，相對溼度則隨高度增加而迅速遞減至 50%左右。

風速觀測方面，當日風箏施放非常順利，風箏升高很快，所以高層資料點比低層多。由風速資料顯示，250 公尺至 450 公尺之間的風速穩定，約為 1.0 m/s。

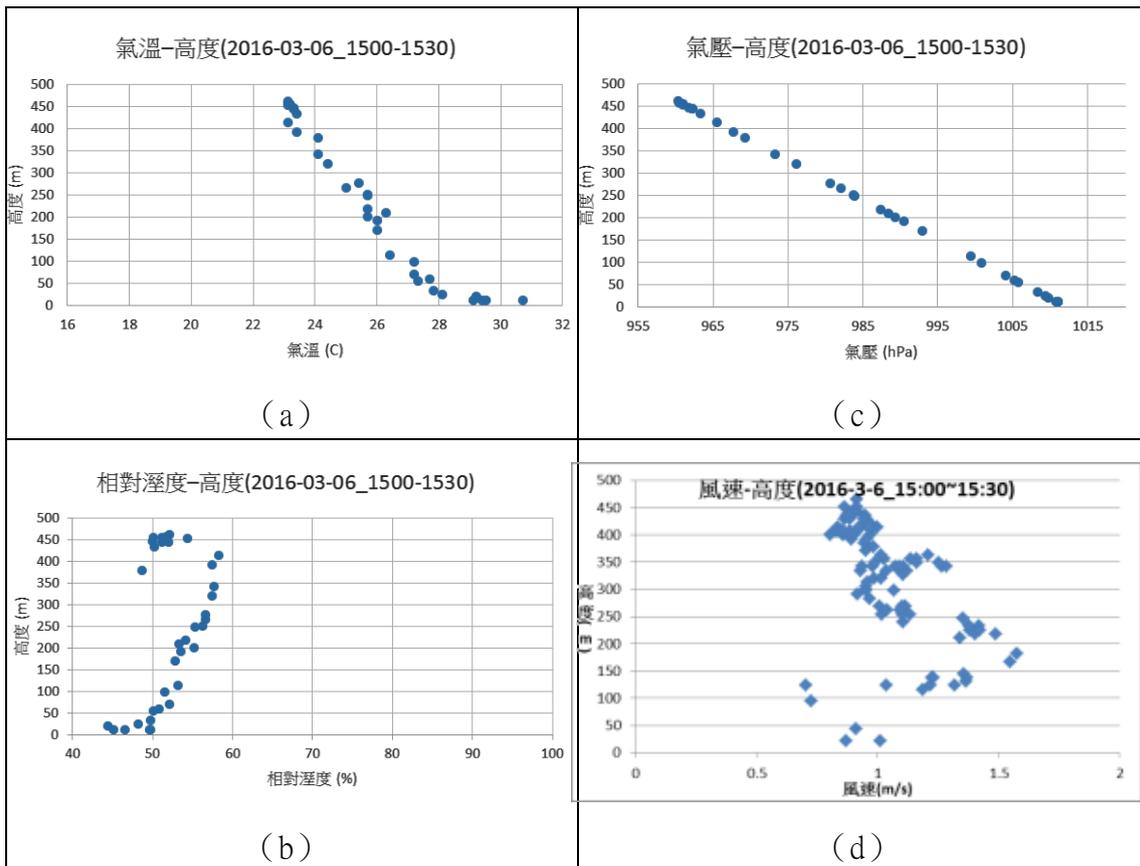


圖 24 2016 年 3 月 6 日觀測資料 (a) 氣溫；(b) 相對溼度；(c) 氣壓；(d) 風速

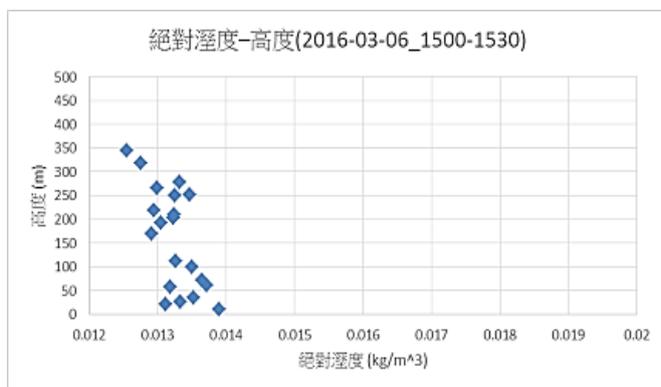


圖 25 2016 年 3 月 6 日絕對溼度與高度關係圖

進一步分析實際水氣量隨高度變化關係如圖 25，在絕對溼度方面地面為 0.014 kg/m^3 ，隨著高度增加及溫度下降，絕對溼度相應減少，遞減率為 0.0009 kg/m^3 每 100m；本日資料與對比 3 月 5 日做對比，絕對溼度圖可以發現 200m 處水氣含量並未有明顯變動，維持在 0.013 kg/m^3 的絕對溼度；而地面情況則是明顯從 0.016 kg/m^3 降低為平均 0.0135 kg/m^3 。

圖 26 (a) (b) (c) 分別為 3 月 7 日氣溫、相對溼度、氣壓觀測結果。

3 月 7 日 15 點 00 分，地表氣壓值為 1011 hPa，地表氣溫為 28.5°C。依大氣靜力方程式推算，本日測得最大高度為 155.7 公尺，高空最低氣壓值 994.6 hPa、最低氣溫 25.8°C。氣溫與氣壓均隨高度增加而下降，氣壓遞減率為 11.406hPa/100m，氣溫遞減率為 2.390 °C/100m。

在可測量的大氣範圍中，相對溼度約在 60% ~ 70%之間變化，地表至 155 公尺高度中，相對溼度大致上隨高度增加而上升。風速變化受限於風弱無高層探空。

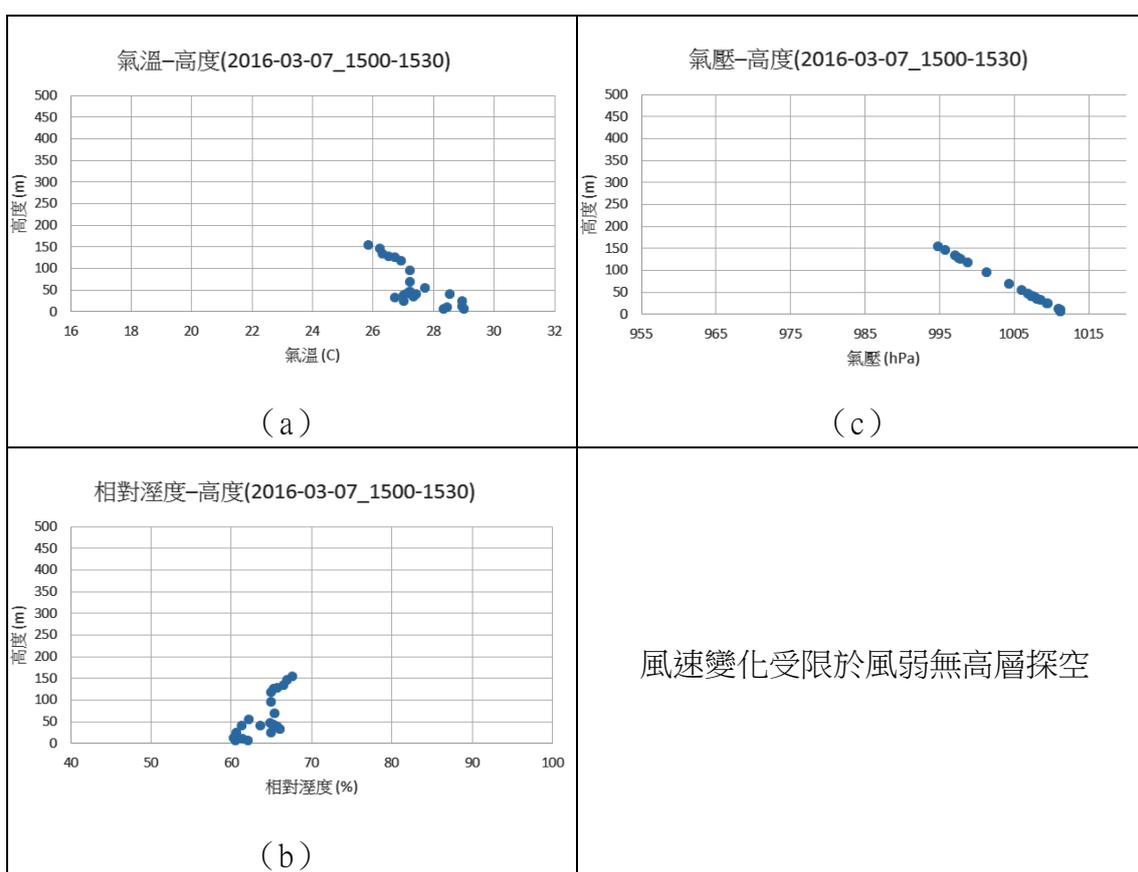
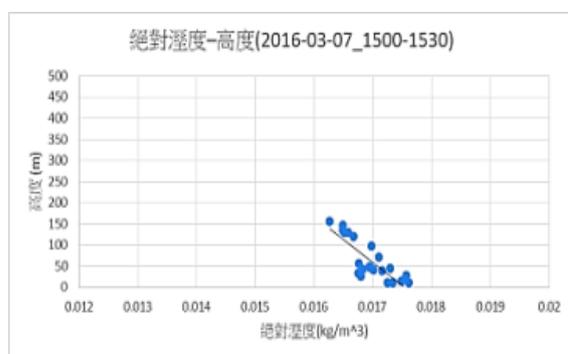


圖 26 2016 年 3 月 7 日觀測資料 (a) 氣溫；(b) 相對溼度；(c) 氣壓



進一步分析實際水氣量隨高度變化關係如圖 27，在絕對溼度方面地面為 0.0175 kg/m³，隨著高度增加及溫度下降，絕對溼度相應減少，150m 內遞減率穩定為 0.0009kg/m³ 每 100m。

圖 27 2016 年 3 月 6 日絕對溼度與高度關係圖

圖 28 (a) (b) (c) (d) 分別為 3 月 8 日氣溫、相對溼度、氣壓、風速觀測結果。3 月 8 日 15 點 00 分，地表氣壓值為 1008 hPa，地表氣溫為 30.5°C。依大氣靜力方程式推算，本日測得最大高度為 440.1 公尺，高空最低氣壓值 960.2 hPa、最低氣溫 26.3°C。氣溫與氣壓均隨高度增加而下降，氣壓遞減率為 11.128 hPa/100m，氣溫遞減率為 1.371 °C/100m。

在可測量的大氣範圍中，相對溼度約在 50% ~ 65%之間變化，地表至 440 公尺高度中，相對溼度隨高度增加而上升，高度約 400 公尺處相對溼度達最大值 64.8%。

值得注意的是，本日的天氣型態非常適合風箏的釋放，我們將風箏施放到最高高度後，多讓風箏停留在高空一段時間，結果發現，在這段時間中，高層的氣溫明顯的逐漸降低，隨著氣溫的變化，相對溼度也在這段時間中逐漸上升。這樣的變化是符合氣溫日變化的走勢情況。

由風速資料顯示，地表至 500 公尺高空之間，風速穩定，且隨高度增加而變快，在約 500 公尺高空測得最快風速約 1.6 m/s。

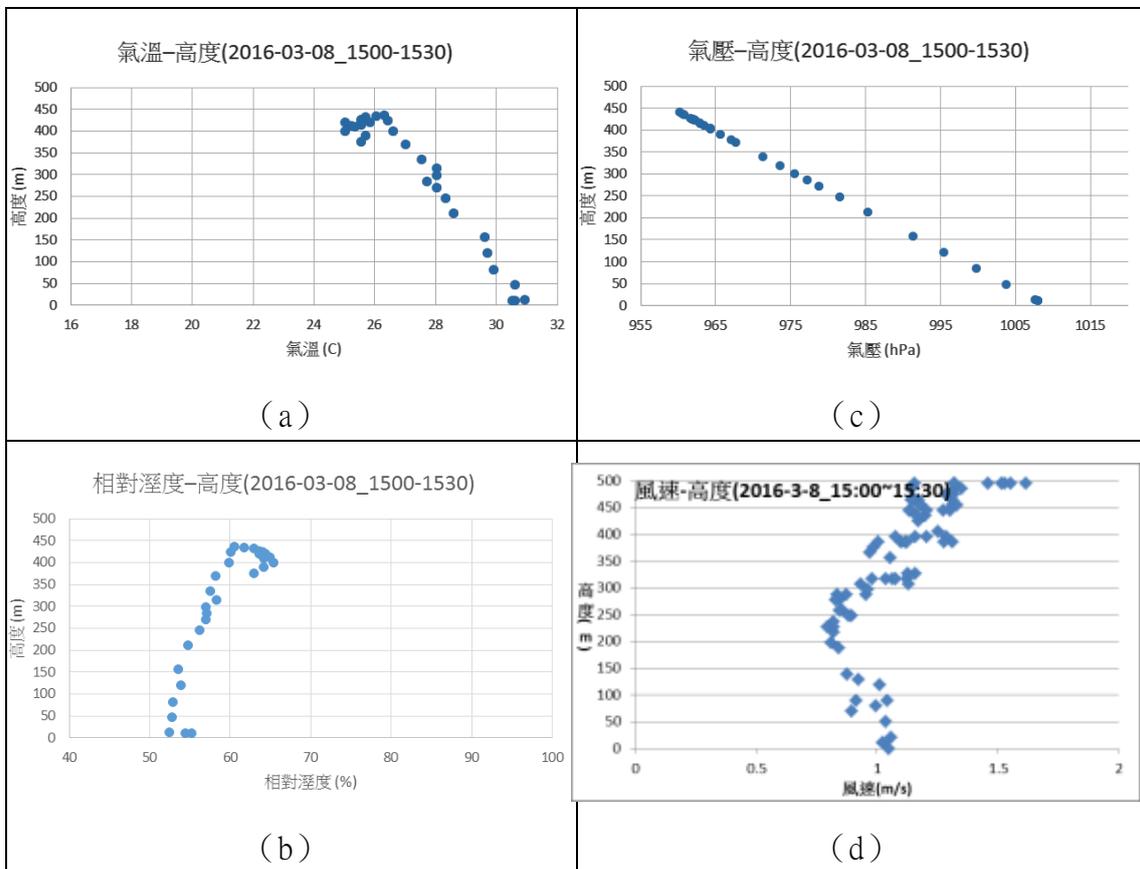
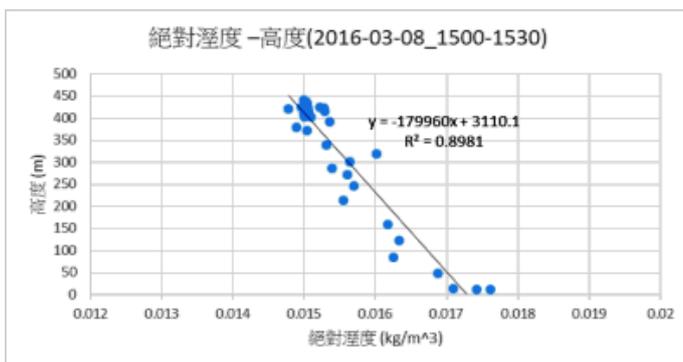


圖 28 2016 年 3 月 8 日觀測資料 (a) 氣溫；(b) 相對溼度；(c) 氣壓；(d) 風速



進一步分析實際水氣量隨高度變化關係，如圖 29，可以發現絕對溼度隨高度做明顯線性下降，總體之遞減律為 0.0005kg/m³ 每 100m。

圖 29 2016 年 3 月 8 日絕對溼度與高度關係圖

圖 30 (a) (b) (c) (d) 分別為 3 月 9 日氣溫、相對溼度、氣壓、風速觀測結果。3 月 9 日 14 點 30 分，地表氣壓值為 1009 hPa，地表氣溫為 27.5°C。依大氣靜力方程式推算，本日測得最大高度為 347.1 公尺，高空最低氣壓值 970.8 hPa、最低氣溫 22.1°C。氣溫與氣壓均隨高度增加而下降，氣壓遞減率為 11.372 hPa/100m，氣溫遞減率為 1.632 °C/100m。

在可測量的大氣範圍中，相對溼度約在 70% ~ 90%之間變化，地表至約 350 公尺高度中，相對溼度隨高度增加而上升，高度約 350 公尺處相對濕度達最大值 91.3%。值得一提的是，這是在觀測期間測得最高的相對溼度值。由風速資料顯示，地表至 200 公尺高空之間，風速較穩定，而 250 公尺以上至 500 公尺之間，呈間歇性陣風，陣風的最大風速隨高度增加而變快，至 500 公尺最快風速約為 4.5 m/s，且陣風風速起伏很大。

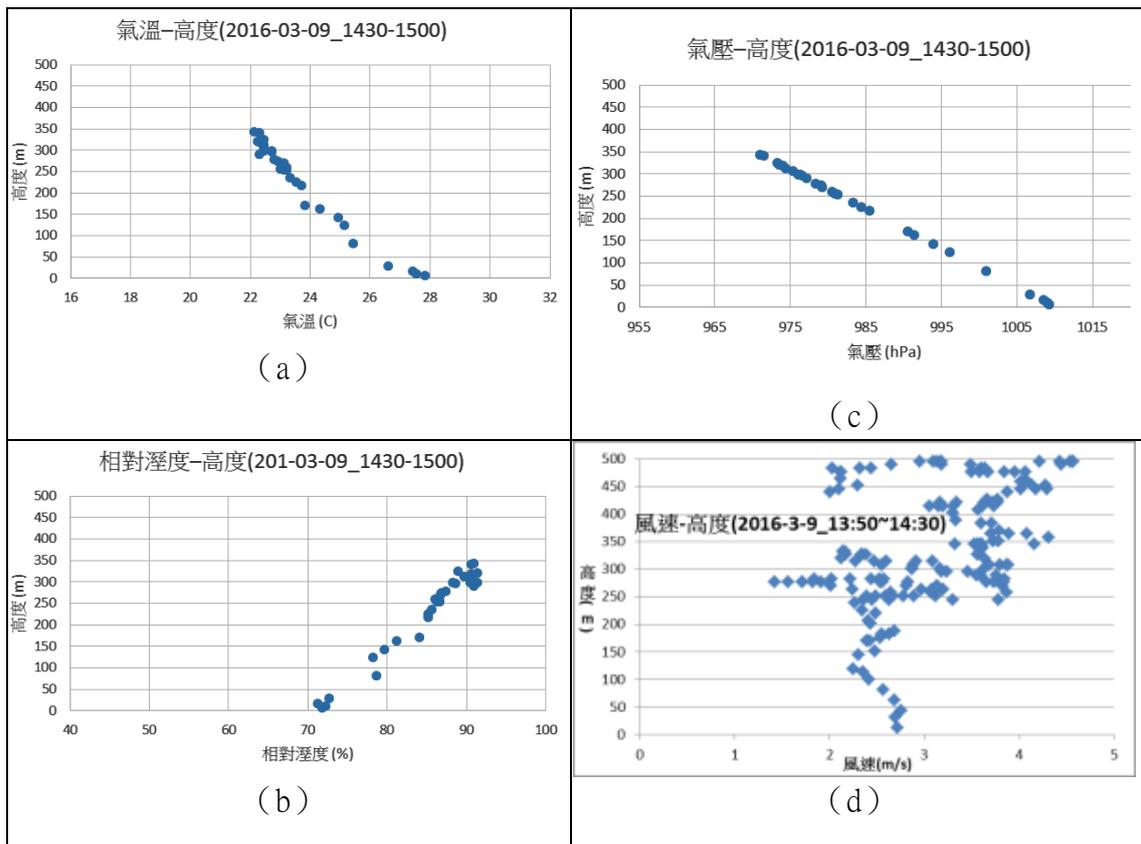


圖 30 2016 年 3 月 9 日觀測資料(a)氣溫；(b)相對溼度；(c)氣壓；(d)風速

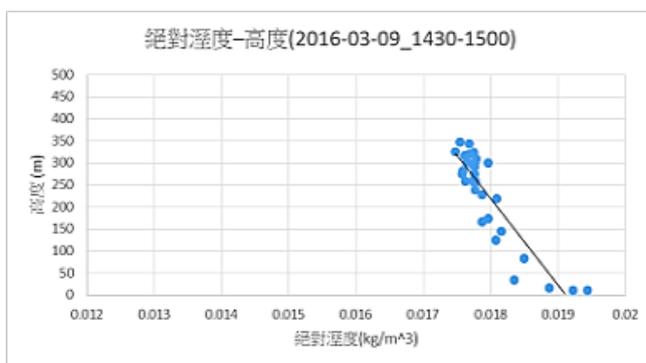


圖 31 2016 年 3 月 9 日絕對溼度與高度關係圖

進一步分析實際水氣量隨高度變化關係，如圖 31，發現其遞減率和 3 月 8 日之實際水氣量遞減率接近 0.0005kg/m^3 每 100m，因此推測兩日之天氣系統無太大變動，且 3 月 9 日在可觀測的高度內，整層空氣的實際水氣量較前一日增加，表示有更多水氣被帶入系統。

圖 32 (a) (b) (c) (d) 分別為 3 月 10 日氣溫、相對溼度、氣壓、風速觀測結果。

3 月 10 日 14 點 00 分，地表氣壓值為 1013 hPa，地表氣溫為 22.0°C。依大氣靜力方程式推算，本日測得最大高度為 315.1 公尺，高空最低氣壓值 978.0 hPa、最低氣溫 17.1°C。氣溫與氣壓均隨高度增加而下降，氣壓遞減率為 11.645 hPa/100m，氣溫遞減率為 1.559 °C/100m。

在可測量的大氣範圍中，相對溼度約在 65% ~ 90%之間變化，地表至 300 公尺高度中，相對溼度隨高度增加而上升，高度約 290 公尺處相對濕度達最大值 88.1%；高度 400 公尺以上至 450 公尺之間，相對溼度則隨高度增加而迅速遞減至 50%左右。

由風速觀測資料顯示，風速明顯隨高度增加而變快約在 350 公尺的高空測得風速超過 8 m/s，是所有觀測期間測得最大風速。

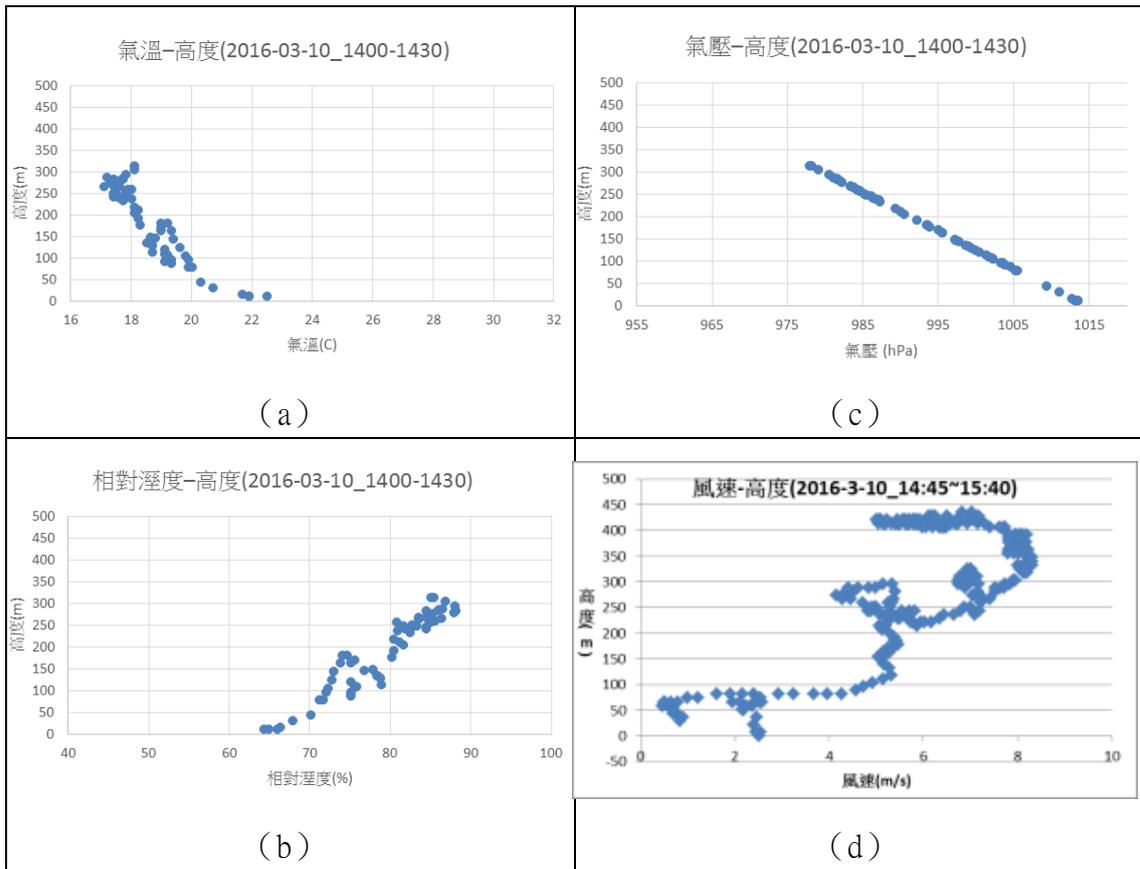
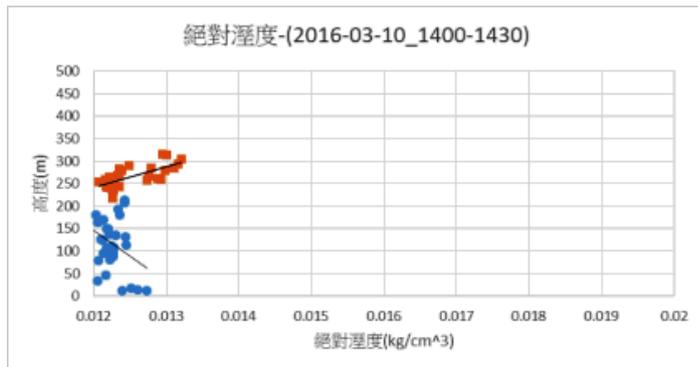


圖 32 2016 年 3 月 10 日觀測資料 (a) 氣溫；(b) 相對溼度；(c) 氣壓；(d) 風速



進一步分析實際水氣量隨高度變化關係，如圖 33，本日測得絕對溼度對比 3 月 9 日，減少 0.007kg/m³，相當於減少了 36.8%。另外，可以發現十分特別的一點，上層的水氣含量反而比近地表還高，大約已 200 公尺高度為一分界，這樣的情況似乎顯示上下氣層的性質可能截然不同。

圖 33 2016 年 3 月 10 日絕對溼度與高度關係圖

圖 34 (a)(b)(c)(d) 分別為 3 月 5 日至 10 日氣溫、相對溼度、氣壓、絕對溼度比較結果。圖中紅色線為 3 月 5 日、橙色線為 3 月 6 日、黃色線為 3 月 7 日、綠色線為 3 月 8 日，藍色線為 3 月 9 日、紫色線為 3 月 10 日。

每一日之觀測時間開始與結束前後僅約半小時，溫度資料之比較可忽略一日不同時間使氣溫變化之因素。此幾日之溫度變化除 3 月 8 日外，皆在近地面處呈現一小段快速下降趨勢，再較高空處趨於平穩下滑，而 3 月 8 日在 375m 處才呈現氣溫快速下滑。3 月 10 日受到蒙古大陸冷氣團壟罩，近地面層的氣溫明顯偏低。

氣壓觀測方面，氣壓遞減率變化幅度小，約在 11.4hPa/100m 上下，所以呈現近似平行線，其差異主要來自於天氣系統的影響，冷鋒鋒面接近，地表氣壓逐漸將低，冷鋒過後，地表氣壓回升。

相對溼度方面，除了 3 月 5 日之外，相對溼度均隨高度增加而上升，這是受到溫度隨高度下降的主導，而 3 月 5 日上層空氣相對溼度隨高度增加而降低，反映出上層空氣的水氣量偏低，推測是受到前一波冷氣團殘留的影響。

絕對溼度方面，在觀測期間，絕對溼度大致上均隨高度增加而下降，但是每日差異很大，主要是受到天氣系統的影響。在 3 月 5 日至 8 日之間，受到暖空氣影響，空氣中水氣量逐日上升，3 月 9 日冷鋒系統到達前，空氣中水氣量達到觀測期間的最大值，3 月 10 日受到冷氣團壟罩的影響，空氣中的水氣量下降到觀測期間的最低值，由此顯示冷暖空氣的性質對空氣中的水氣量有強烈的影響。而 3 月 10 日上層空氣的絕對溼度略大於下層，我們推測原因是上層仍殘留之前暖空氣的性質所致。

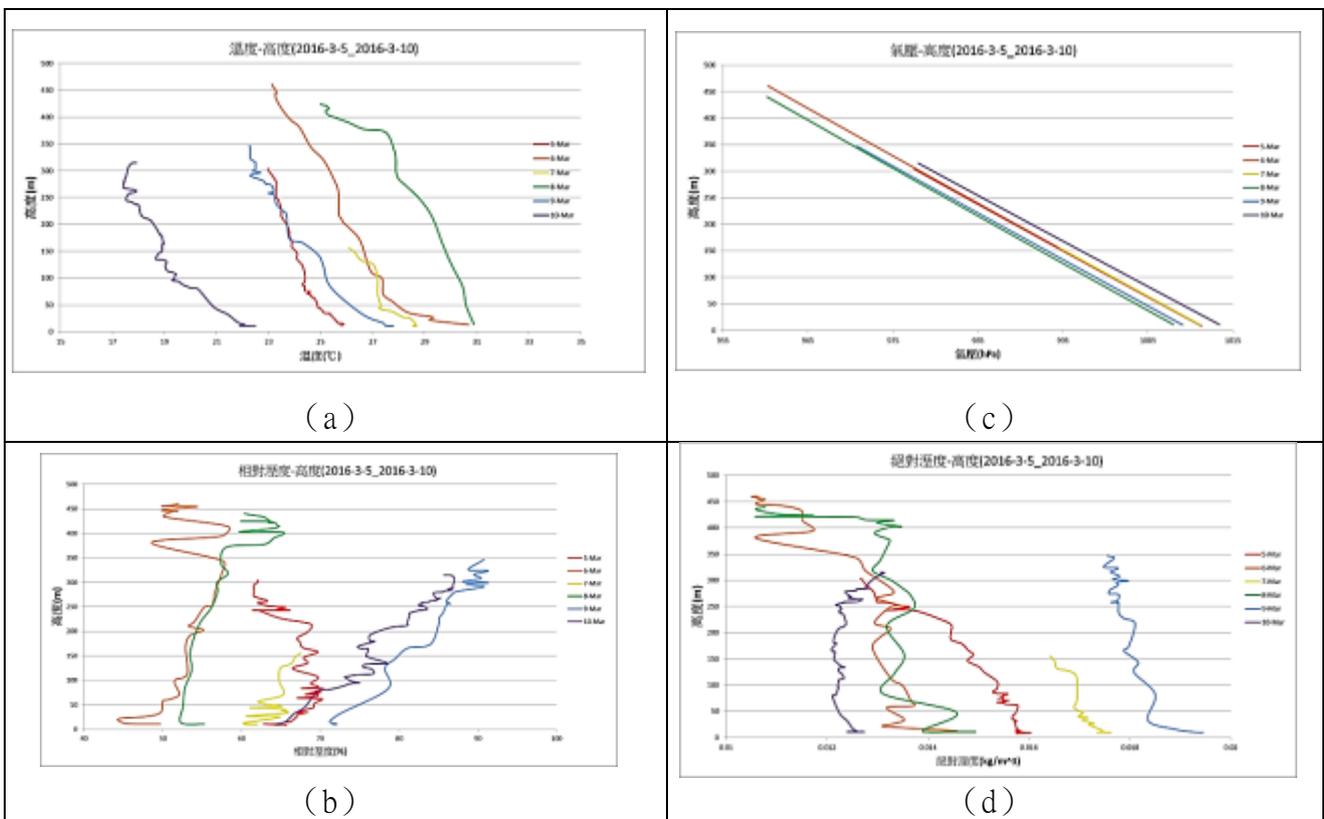


圖 34 2016 年 3 月 5 日至 10 日各項資料比較
 (a) 氣溫；(b) 相對溼度；(c) 氣壓；(d) 絕對溼度

4. 案例四，2016年9月17日16:20至17:10，進行風箏觀測。

(1) 天氣概況：此日為晴時多雲的天氣型態，台灣的天氣受尼伯特颱風影響，高雄的風向以西北風為主，而在PM 2.5濃度地面場中各地皆為低濃度的情形。



圖 35 2016 年 9 月 17 日 (a) PM 2.5 濃度地面場圖 (b)風速圖 (c)風場圖

(2) 觀測結果：

圖 36 為 PM 2.5 濃度對溫度反轉作圖。由於溫度和高度呈現高度的負相關，因此考慮在失去溫度濕度氣壓儀資料的情況下以氣溫反轉作為高度指標。圖中我們可以發現 PM 2.5 濃度隨高度未有明顯趨勢，推測可能是因為 9 月 17 日颱風外圍氣流帶來其他地區的空气，再以環流風將邊界層空氣混合，使邊界層內 PM 2.5 濃度隨高度變化不大且會有局部高度濃度高低變化的情形。

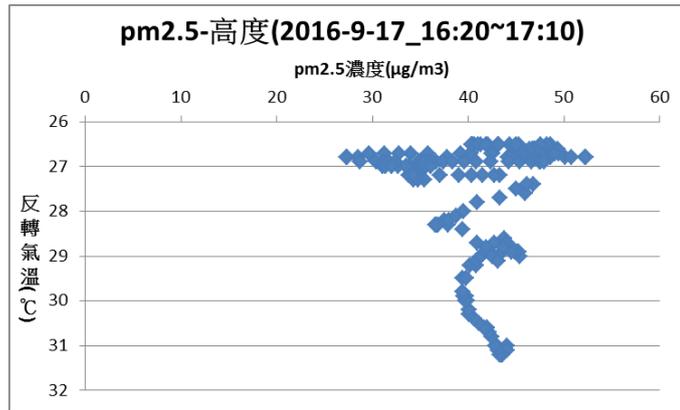


圖 36 2016 年 9 月 17 日 PM 2.5 濃度-高度圖

在最後案例四的探空觀測時，風箏線由於節點不堪負荷而不幸在實驗中斷裂，導致風箏及儀器飄落，雖然經過多日急尋仍然遍尋不著，疑似遭人撿拾因此已報警處理。我們因此失去了溫度濕度氣壓儀、空氣品質監測儀及風箏，估計損失三萬二千元。而且由於 PM 2.5 數據儲存於監測儀記憶體，因此空氣品質監測儀的遺失導致了實驗四的資料不完整，在不失科學精神「有幾分數據說幾分話」的情形下，並無法產生及推導出合理的科學假說及理論，實為本實驗一大缺憾。在這次教訓後，其實本問題相對容易解決：考慮用更高抗拉張力的凱夫拉線取代尼龍線，其在重量相當的情形下可顯著提升風箏組的抗拉張力；而風箏也可將骨架加以強化以防斷骨的情形發生，如此便可確保往後本研究實驗時之穩定性。

肆、結論：

- 一、案例一白天溫度起伏大且氣溫零星起伏大，小時溫差可達 2°C。入夜後，溫度一路下滑至 19°C，且溫度無明顯起伏。推測是由於太陽輻射、雲量變化、風場交互作用的結果。若某段時間中，若雲量增加、風速增強，會造成局部時間的降溫作用，而太陽輻射增強時加溫近地表空氣，則氣溫會升高。
- 二、案例一白天的相對濕度值在 75% 以下。午後相對溼度值逐漸上升，夜晚時相對溼度為全天最高。考慮絕對水氣的變化後可以排除水氣進出於觀測的影響，因而確定相對溼度和氣溫有很大的負相關性。
- 三、案例二資料顯示高度越高則氣溫越低，且不同特性之空氣會有不同的氣溫遞減率，根據案例二資料可以推測上層可能有不同溫度性質的空氣或是暖平流導致了不同的遞減率。
- 四、案例二資料顯示相對溼度隨高度增加而上升，考慮討論二氣溫和相對溼度之關係，將探空資料做絕對溼度變化圖後可以排除水氣進出於觀測的影響，再次證明氣溫和相對溼度之負相關。
- 五、案例二與案例三的資料顯示，高度和氣壓有極高線性負相關，可做為高度指標。
- 六、案例二與案例三的資料顯示，本研究的觀測範圍皆在大氣邊界層之中，風速呈現明顯間歇性變化，由於越接近地表摩擦力越大，所以陣風的最大風速隨著高度增加而變快。
- 七、案例三的資料顯示，受到天氣系統的影響，氣溫、氣壓、相對溼度、絕對溼度逐日都有不同的變化。而近地面的變化反應相當明顯且迅速，而上層的空氣變化反應會有一點時間差。
- 八、由於資料量不多，因此無法完全斷定案例四的結論。但 9 月 17 日資料顯示風速的增加可能導致 PM 2.5 濃度隨高度的混和。

伍、討論：

- 一、地面上若無劇烈天氣系統通過，則氣溫日變化和輻射加熱及冷卻有關，且相對溼度與氣溫呈高度負相關，夜晚氣溫降低，相對溼度則上升。
- 二、溫度和高度也有負相關，無論邊界層高度為何，相對溼度在短時間內和氣溫有強烈關係，在 12 小時之內空氣中水氣變化量不明顯，當時間尺度大於 12 小時，才能觀察到明顯水氣進出。
- 三、風速在地面因為地表摩擦力及擾流而常會出現陣風，在垂直變化上，地表附近最低風速常小於 1m/s，隨著高度的增加，風速最大值會隨之提升。
- 四、氣壓在地面不會有劇烈變動，但與高度呈現良好的線性變化以及極高負相關。
- 五、絕對溼度為空氣實際水氣量，一般來說，大氣層中的水氣集中在對流層，我們可以進一步的說，對流層中的水氣又集中在近地表的氣層中。通常絕對溼度隨高度增加而下降。

- 六、案例三觀測期間經歷冷鋒過境與蒙古大陸高壓南下的天氣系統變化，地面氣壓呈現逐日下降的趨勢，在3月8日鋒面抵達前達到最低，之後地面氣壓上升，顯示受到高壓系統的控制。地面氣溫則在冷鋒到達後，呈現下降趨勢，顯示受到冷氣團的影響。
- 七、相對溼度的大小同時受到氣溫和絕對溼度的影響，不適合做為空氣中實際水氣含量的標準。如3月7日至8日，相對溼度下降，但實際水氣量卻沒有明顯變化。
- 八、要了解空氣中水氣含量的變化，應以絕對溼度作為指標。絕對溼度受到天氣系統的控制，和溫度呈現正相關：例如位於冷鋒鋒面前抬升相對暖區，絕對溼度為高；當進入冷鋒後的冷氣團範圍中，絕對溼度偏低。
- 九、邊界層空氣的氣溫變化反應會發生在水氣變化反應之前。如3月7日至8日，氣溫上升，使得相對溼度下降。這是因為水氣量並不會馬上隨溫度增減而需要時間移出或移入的結果。
- 十、邊界層空氣的上層水氣變化反應會落後下層。下層的水氣變化會可以反應天氣系統的差異，而上層則會對於天氣特性的改變有延遲的現象。
- 十一、考慮以上討論與結論後，我們可以闡明天氣系統與氣溫對於相對溼度和絕對溼度的機制：假設在三維邊界層環境下有一天氣系統移入，其氣溫特性與本地不同。天氣系統移入後低層氣溫會隨之改變，因此空氣飽和水氣壓和氣溫呈現正相關改變，使得相對溼度和氣溫會有負相關變化。爾後相對溼度的改變產生需要一段時間的水氣進出，使環境絕對溼度有所增減；而邊界層上層空氣則會因混合作用而逐漸由低層接收水氣，而混和是需要時間的，因此上層相對溼度與絕對溼度變化會有相對延遲於低層的時間差。以冷鋒為例：冷鋒移入導致氣溫驟降，飽和水氣壓降低而使相對溼度增加，並引起水氣移出而降低絕對溼度，邊界層高層則有約一日的延遲現象。
- 十二、考慮在高雄探空實驗的局部性，我們在蒐集長期觀測後發現：
- (一) 高雄風向受季風影響而有季節性和天氣系統性的變化，大致上夏天以西南風、冬天以北風為主，且北風風速相對強且穩定，是故冬天更適合本研究方式的進行。
 - (二) 高雄氣溫有季節性和周日的變化，夏天為高而冬天為低。
 - (三) 高雄氣壓有季節性和周日的變化，夏天較低而冬天較高。
 - (四) 高雄相對溼度無明顯趨勢，但絕對溼度有季節性的變化：夏天為高而冬天為低。
 - (五) 高雄PM 2.5濃度有季節性的變化，夏天較低而冬天較高；且冬天時平均濃度極高，常常到達標準上限，形成空氣品質"紫爆"的現象。

根據(一)及(五)，高雄市冬天的PM 2.5垂直剖面是值得探究且相對易於研究的目標，希望未來可以再更加精進，繼續進行未竟的研究。

陸、應用：

本研究最終完成了目的一至四，成功自製了相較便宜許多的風箏探空，再加以購置並改裝觀測儀器，完成了氣象要素隨時間、垂直剖面及連續觀測的綜合結果，如：氣溫、氣壓及絕對溼度隨高度的遞降；相對溼度及風速隨高度的遞增；以及相當有趣的，相對溼度和絕對溼度對於氣溫的負相關及正相關性，並於精進之際以相同方式試圖研究長期為人所詬病的高雄空氣品質。然而資料豐富的背後總是有辛勞的，本研究其實不若原先想像的輕鬆：施放抓數據時間長且辛苦、天候不佳時（如閃電、雨前微暴流等……）無法施放、寒風烈日下實驗都是難處，甚至在實驗四時還發生了斷線而遺失儀器的情形。然而經過種種失敗、改良、測試、實驗、分析、進步，我們最終仍完成目的一至四，只希望能對邊界層之研究有所助益。而細懸浮微粒觀測甚或是環境公害的證據提供都是在我們改進後可以繼續研究的對象。2016年9月12日台北101大樓PM2.5測站啟用，其探測理念同樣是觀察PM2.5垂直剖面，進以研究其污染來源及嚴重程度，而這個消息也給予我們實驗莫大的鼓舞及期許，期待有更多研究持續發展。以下是我們未來的展望：

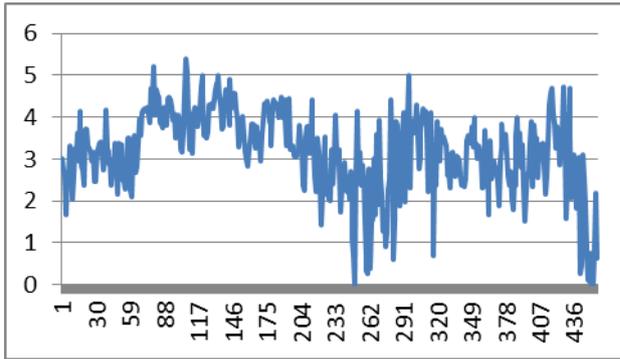
1. 重新購置更強的風箏組及儀器以加強觀測方式穩定性，以便因應多樣化的研究對象。
2. 以科學方法提供環境公害汙染（如許厝國小案例）的實質科學客觀證據。
3. 藉著本實驗瞭解天氣現象（如逆溫現象等）的垂直結構。
4. 廣設測站，如移動式雷達回波車一般進行機動式各地觀測，可多點同時施測並即時彙整，以分析天氣系統之三維結構。
5. 掛載其他儀器（如臭氧偵測器、光化學汙染物偵測器）研究更多物質的垂直分層。

最後，本研究方式目前由此作品為創始者，作者希望能夠拋磚引玉，讓大家發揮創客精神讓此探空方式有更多發展的可能，能給予更多志同道合的研究者們參考應用。

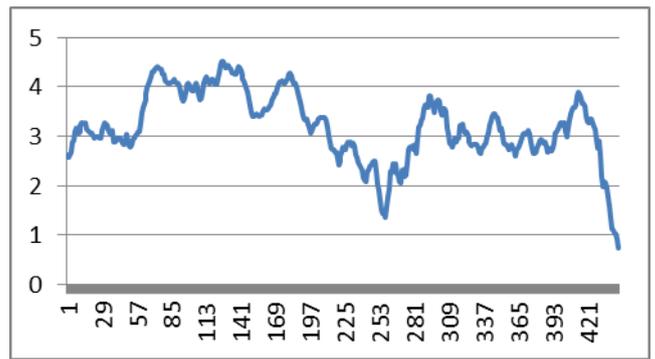
<附錄>

<附錄一>：數據處理

1. 風速計設定為每 10 秒記錄一筆資料，並將風速資料採 1 分鐘 40 秒，即 10 筆資料的移動平均值並作分析，可得較明顯趨勢。
2. 溫溼度氣壓儀設定為每 30 秒記錄一筆資料並直接分析之。



附圖一 風速資料移動平均前



附圖二 風速資料移動平均後

<附錄二>：絕對溼度、高度推導及確認

1. 空氣中實際水氣量推算：

將空氣溫度與相對溼度依公式做轉換計算。查詢空氣溫度與飽和水氣壓曲線圖，利用查表可得知各整數攝氏溫度時，空氣中飽和水氣壓大小（單位：mb）。我們以 Excel 做對數內插的方式，計算得不同溫度時，空氣中飽和水氣壓大小。利用以下絕對溼度公式，求得某溫度時，空氣中的實際水氣量，即大氣絕對溼度。

$$\rho_{w,max} = \frac{e}{R_w * T}$$

其中 $\rho_{w,max}$ 為該溫度下最高溼度

R_w 為水的氣體常數（461.5 J / (kg·K)）

T 為溫度

e 為某溫度下飽和水氣壓

$$\rho_w = \frac{654.7 * 2.718^{[0.063 * (T - 273.15)]}}{4.615 * T} \times RH$$

其中 T 為該資料點之溫度，溫度單位為絕對溫標凱爾文（K）

RH 為該資料點之相對溼度，單位為百分比（%）

ρ_w 為求得之絕對溼度，單位為公斤每立方公尺（kg/m³）

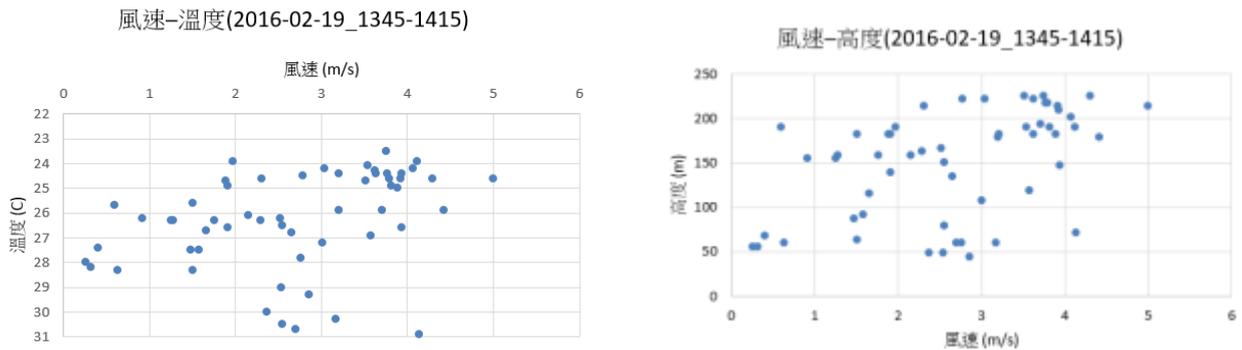
例如，當某時刻之溫度為 303.85K，相對溼度為 39.1%，其絕對溼度即為

$$\rho_w = \frac{654.7 \cdot 2.718^{[0.063 \cdot (303.85 - 273.15)]}}{4.615 \cdot 303.85} * 39.1\% , \text{其值為 } 0.0126 \text{ kg/m}^3。$$

<附錄三>：風速計資料的高度推算法

考慮到儀器重量，風箏可能無法同時載掛風速計與溫溼度氣壓儀，又風速計僅能測得風速與氣溫的資料，並無法直接獲得高度資料。但是由於溫度和高度有相當高的負相關性，因此我們可以利用溫度作為風速計高度的指標：利用兩儀器測得溫度之關係配合趨勢線的線性公式來推算風速計資料之高度，以繪製風速與高度的關係圖。

首先，將溫濕壓儀溫度與風速計溫度作折線圖，並分別計算兩者趨勢線的線性公式。令溫溼度氣壓儀測得的溫度為 T_1 、風速計測得的溫度為 T_2 ，可將溫溼度氣壓儀溫度線性公式表示為 $T_1 = A + C_1$ ；風速計溫度的線性公式表示為 $T_2 = A + C_2$ ，其中 C_1 、 C_2 為兩常數。將兩式作運算 $T_1 - T_2 = (A + C_1) - (A + C_2) = C_1 - C_2$ 為一常數，故 $T_1 = T_2 + (C_1 - C_2)$ ，將 $T_1 = T_2 + (C_1 - C_2)$ 代入圖十三 (a) 溫度 T_1 與高度作圖中的趨勢線線性公式，可表示為 $H = a T_1 + b$ 即可推算溫度為 T_2 時之高度，建立風速與高度之關係。轉換結果如圖附三，在案例三的研究中，均使用此方法來表示風速與高度的變化關係。



附圖三 建立風速計風速資料與高度關係

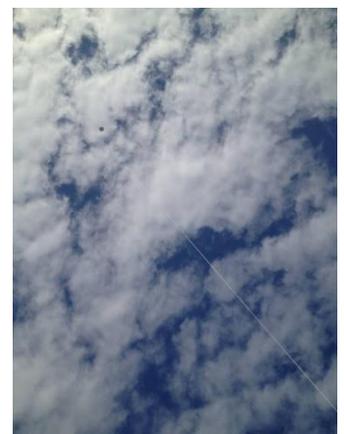
<附錄四>：實驗過程相片

1. 原始設計草案



2. 輔英科大環工系探空氣球實驗 暨 觀測儀器雙重比對



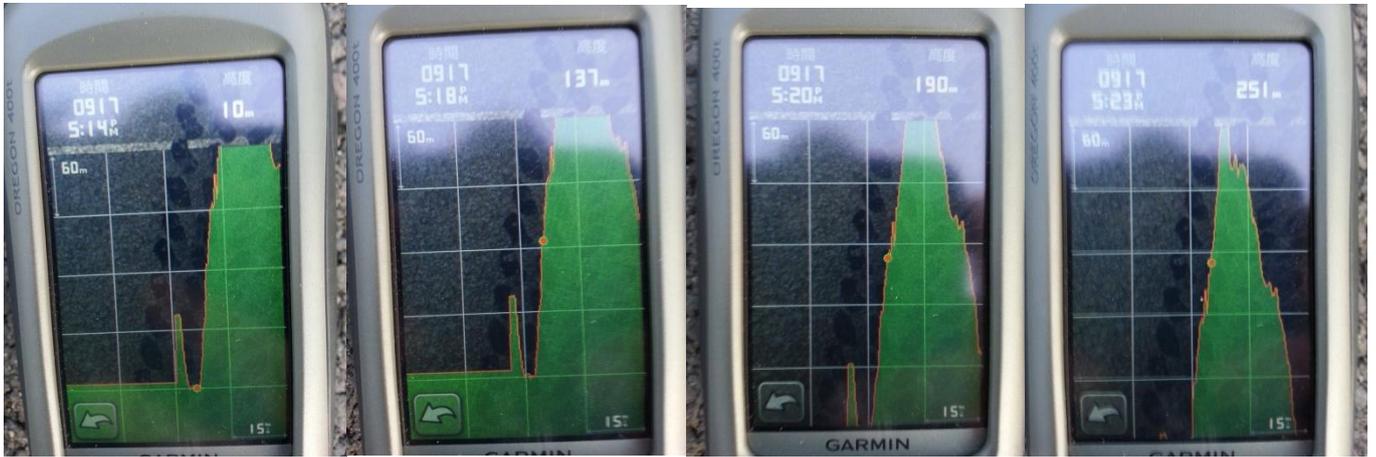
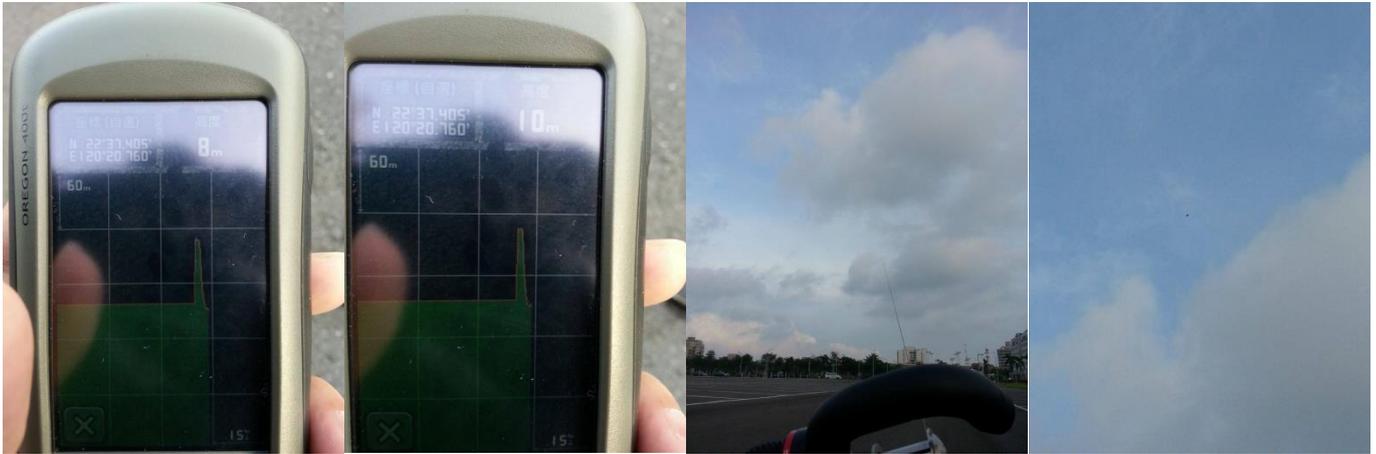


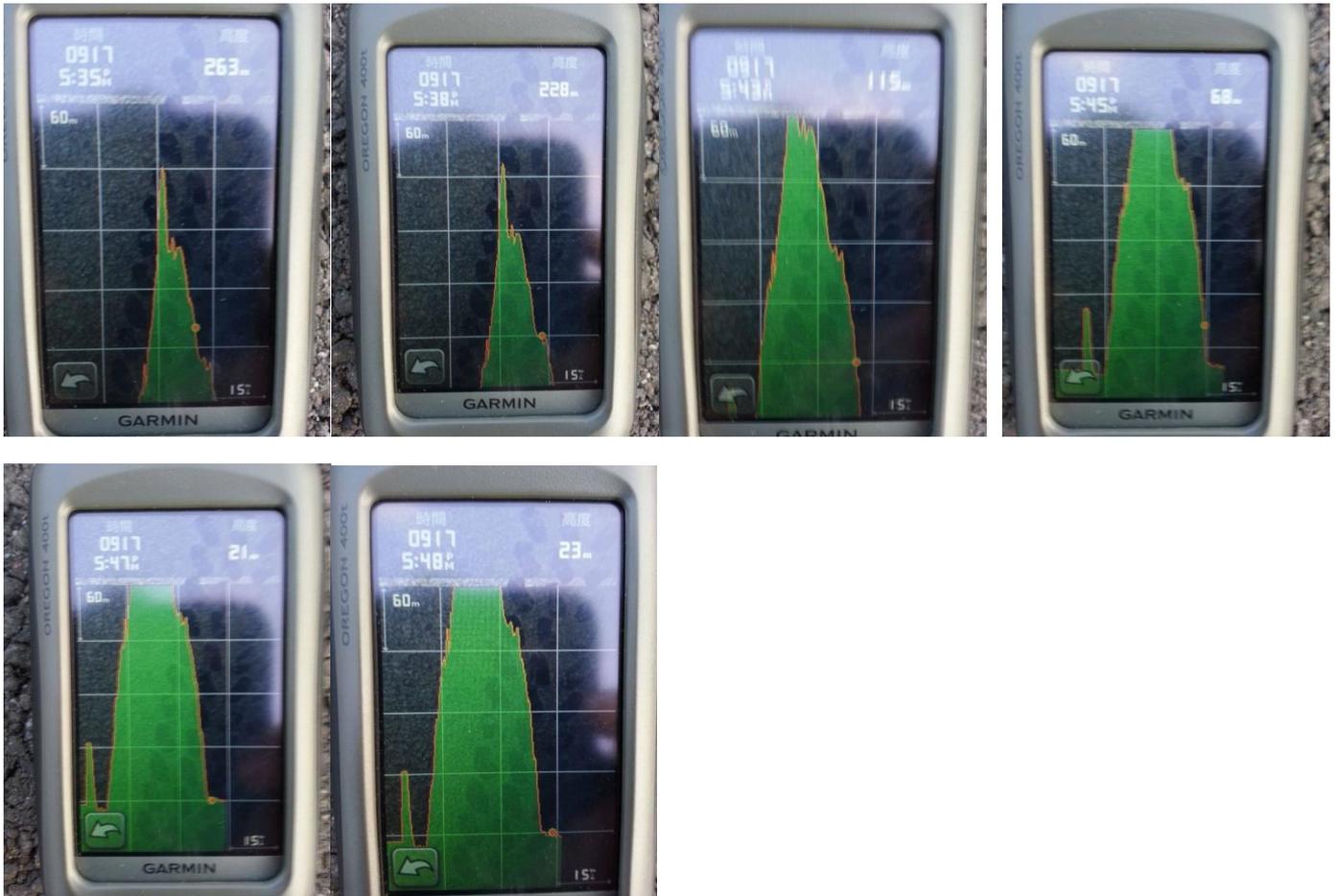
3.風箏探空首次施放 暨 儀器探空實測





4. GPS 高度實測 暨 公式高度數據取得





5. 完整風箏實測過程記錄



必備儀器組



風箏架設

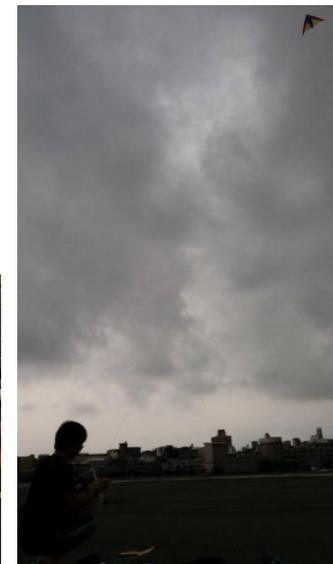




組裝風箏組



風箏及前導線施放

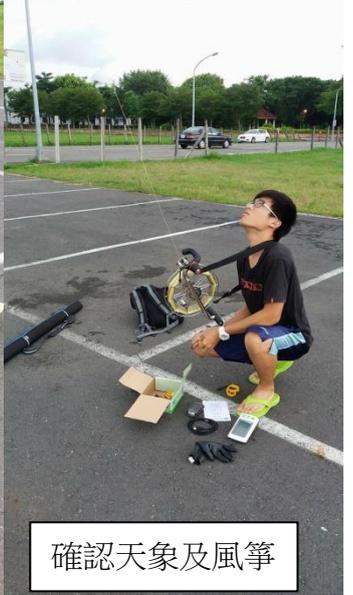




準備探空儀器



儀器確認及設定



確認天象及風箏



儀器掛置



回眸一笑



儀器升空



升空階段





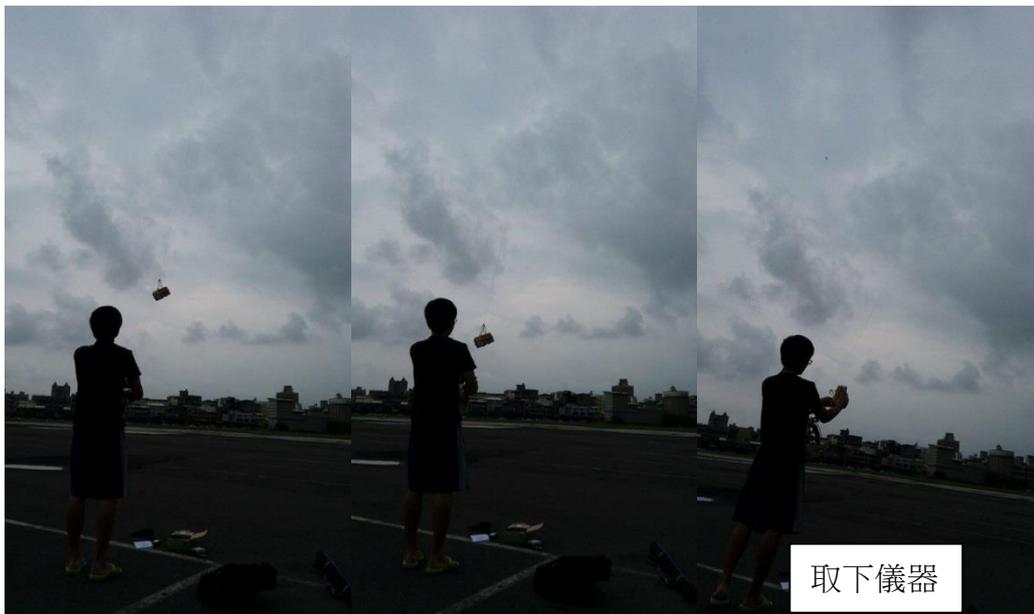
施放階段



資料蒐集階段



儀器收回階段



取下儀器



取下風箏



... 打完收工 over☺