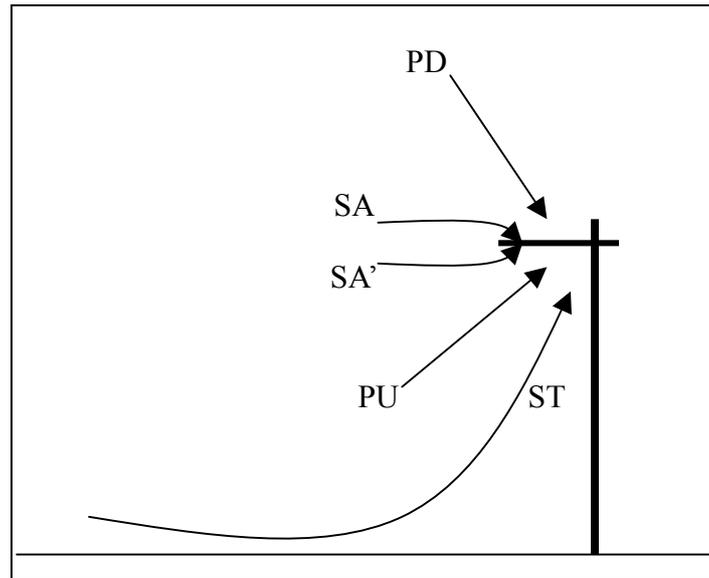


1. 公式推導



圖一：乾沉降板收集懸浮微粒之機制

Dry deposition ratio 是落下的懸浮微粒與上揚的懸浮微粒的比值，可表示成：

$$\text{Dry Deposition Ratio} = \text{DWF} / \text{UWF} \quad (1)$$

圖一為乾沉降板收集懸浮微粒之機制，主要可分成 Downward flux (DWF) 以及 Upward flux (UWF) 兩種。DWF 的部分主要為 Surface Attachment (SA) 與 Particulate Deposition (PD)；UWF 的部分則為 Surface Attachment (SA')、Particulate Upflow (PU) 以及 Surface Traction (ST)。因此，我們可以將公式 (1) 改寫成：

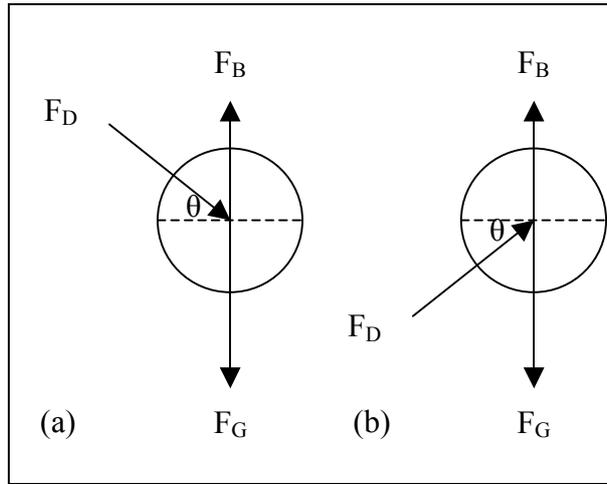
$$\text{DWF}/\text{UWF} = (\text{SA} + \text{PD}) / (\text{SA}' + \text{PU} + \text{ST}) \quad (2)$$

這裡的 SA 與 SA' 為懸浮微粒在近沉降板表面的被吸附現象，由於本研究假設流體狀況為均勻流，且乾沉降板本身很薄（約 1 cm 厚）而且具有流線設計，因此在均勻流的狀況下，乾沉降板上下所通過的氣流應相似，故我們假設 $\text{SA} = \text{SA}'$ ，且因為主要附著的是細微粒 ($D_p < 1 \mu\text{m}$)，因此其通量極微小而可忽略不計。ST 為地表土壤或顆粒受到風的作用而揚起之懸浮微粒通量，因此這個部份僅會影響到 UWF 的部份，因此在極低風速時 (Wind speed $< 1 \text{ m/s}$)，風沒有足夠的力量將地表的顆粒揚起，此時 ST 並不會影響 UWF，也就是 Ratio 僅被 PD 與 PU 所決定。PD 與 PU 的部份，我們可以用單位時間所收集到的總質量來表示懸浮微粒的通量。因此，根據力與質量的關係，我們可以用受風而落下或上揚之顆粒的力 (F) 來描述顆粒移動，落下與上揚的 F 可定義為：

$$\Sigma (F_{\text{DOWN}}) = F_D + (F_G - F_B) \quad (3)$$

$$\Sigma (F_{\text{UP}}) = F_D - (F_G - F_B) \quad (4)$$

這裡的 $\Sigma (F_{\text{DOWN}})$ 是顆粒落下時的總合力 ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$)， $\Sigma (F_{\text{UP}})$ 是顆粒上揚時的總合力 ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$)， F_D 是顆粒的形狀阻力 ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$)， F_G 是顆粒所受到的重力 ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$) 以及 F_B 是顆粒所受到的浮力 ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$)。



圖二：顆粒的受力。(a)為使顆粒落下的力；
(b)為使顆粒揚起的力。

圖二為落下與揚起之顆粒的受力。重新定義公式(2)為：

$$\text{Dry Deposition Ratio} = \Sigma (F_{\text{DOWN}}) / \Sigma (F_{\text{UP}}) \quad (5)$$

或是

$$\text{Dry Deposition Ratio} = F_D + (F_G - F_B) / F_D - (F_G - F_B) \quad (6)$$

接著，我們根據**史托克**(Stokes)利用勢流理論，當流體對顆粒的雷諾數(Re)小於0.1的情況下，其阻力係數(C_D)為 $24/Re$ 。因此，我們可以假設流體對顆粒所形成的形狀阻力(F_D)可以公式表示為：

$$F_D = 3\pi D\mu U \quad (7)$$

或是

$$F_D = 3\pi D\rho_a v U \quad (8)$$

這裡的D是顆粒的直徑(m)， μ 是流體的靜黏滯係數(kg/m-s)，U是流體相對於顆粒的流速(m/s)， ρ_a 是空氣的密度(kg/m³)以及v是流體的動黏滯係數(m²/s)。此外，我們假設流體對顆粒的作用是以45°的角度施力。因此，可將公式(8)改寫成：

$$F_D = 3\pi D\rho_a v U \sin\theta \quad (9)$$

而公式(3)、(4)與(6)中，顆粒所受的重力(F_G)與浮力(F_B)，可分別表示為：

$$F_G = \rho_a V g \quad (10)$$

$$F_B = \rho_p V g \quad (11)$$

這裡的 ρ_a 是空氣的密度(kg/m³)， ρ_p 是顆粒的密度(kg/m³)，V是顆粒的體積(m³)以及g是重力加速度(m/s²)。

在計算的部份，我們根據環保署對懸浮微粒的定義為粒徑小於100 μm的顆粒，且在空氣中各粒徑的量為平均分佈。之後根據公式(6)，計算風速為1~5 m/s

以及 ΣD_p 為 $1 \sim 100 \mu m$ 時，其 Ratio 分別為 3.20、1.94、1.54、1.38 與 1.29。接著利用公式 (12) 檢查各粒徑在不同風速時，其 Re 數是否低於 0.1，如果是低於 0.1 則表示假設成立，如果是高於 0.1，則必須重新將 C_D 值考慮進去公式中。

$$Re = UD/v \quad (12)$$

然而檢察 Re 數之後，發現幾乎都高於 0.1，因此我們必須重新定義 C_D 值，並重新將 C_D 值考慮進去公式，而 C_D 值的計算公式可依 Re 數來決定：

$$0.01 < Re < 20, C_D = 24/Re[1+0.1315Re^{(0.82-0.05\log Re)}] \quad (13)$$

$$20 < Re < 260, C_D = 24/Re(1+0.1935Re^{0.6305}) \quad (14)$$

待重新計算 C_D 值之後，我們以公式 (15) 來計算新的 F_D 。

$$F_D = 0.5C_D\rho_a U^2 A \sin\theta \quad (15)$$

這裡的 A 是顆粒的受力的截面積 (m^2)

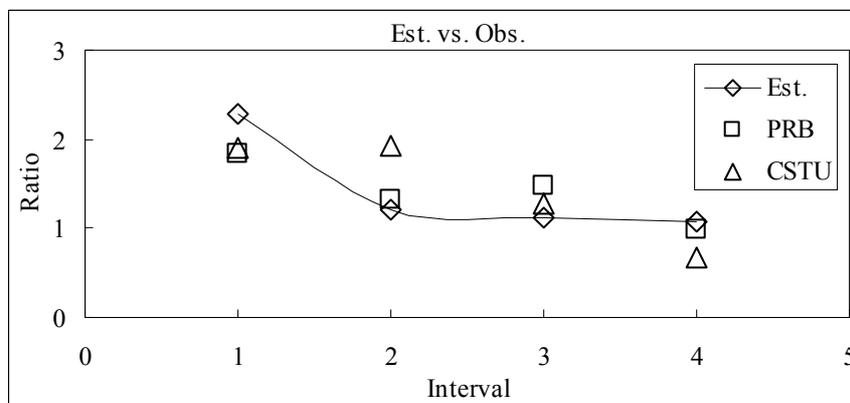
經過公式 (15) 的計算之後，將 F_D 帶入公式 (6)，在風速為 $1 \sim 5 m/s$ 時，其 Ratio 各別為 3.31、1.27、1.13、1.09 與 1.07。另外，我們為了方便與觀察值比較，因此將風速分為四個區間，分別為區間 1： $1 \sim 2 m/s$ 、區間 2： $2 \sim 3 m/s$ 、區間 3： $3 \sim 4 m/s$ 以及區間 4： $4 \sim 5 m/s$ ，可依序得到其 Ratio 分別為 2.29、1.20、1.11 以及 1.08。

2. 結果與討論

2.1 模擬結果

在一般狀況下，我們認為當風速較低 ($Wind\ speed < 2 m/s$) 時，風能造成 PU 的量較小，因此 $Ratio > 1$ 。當風速為中風速 ($Wind\ speed = 2 \sim 3 m/s$) 時，風對 PD 與 PU 的影響相當，因此其 $Ratio = 1$ 。當風速較高 ($Wind\ speed > 3 m/s$) 時，除了會同時增加對 PD 與 PU 的影響之外，根據蒲福風級表可知當風級為微風與和風 ($3.4 \sim 7.9 m/s$) 時，其風勢也會導致地表的顆粒揚起，而使得 $Ratio < 1$ 。

圖三為估計值 (Estimation) 與觀察值 (Observation) 的比較。結果顯示在估計值與觀察值的部份，其 Ratio 都有隨著風速的增加而下降的趨勢，這個結果說明當風速越大時，上揚的懸浮微粒通量會越高。此外，在估計值的部份，因為僅探討 PD 與 PU，因此會與觀察值的實際情況有所差異。



圖三：估計值 (Estimation) 與觀察值 (Observation) 的比較。

在區間 1 (Wind speed : 1 ~ 2 m/s) 時，估計值 (2.29) 比 PRB (1.83) 與 CSTU (1.89) 的觀察值都高。這個結果表示，在實際的狀況下，當風速較低時，仍會將部份細微粒揚起，增加 PU 的量。估計值由於僅單純考慮懸浮微粒受力的情形，因此其值會趨向理想狀態，因此其 Ratio 會較觀察值高。另外，CSTU 的觀察值又高於 PRB，這可能是因為兩處的地表性質不同，所造成的影響。CSTU 的地面是草地，其粗糙長度 (0.1 ~ 0.5 cm) 會較 PRB 的水泥地面大 (0.002 cm)，因此越接近地面的風速會越低，這個結果會造成兩地的地面風速會有些微的差異，因此造成 PRB 處，其揚起的細微粒較 CSTU 略多。

在區間 2 (Wind speed : 2 ~ 3 m/s) 時，估計值 (1.20) 是低於 PRB (1.32) 與 CSTU (1.93) 的觀察值。這個結果顯示估計值與 PRB 之間較為接近，這是因為 PRB 為水泥地面，其狀況較接近理論條件，但是仍會對 PU 有些微的影響，所以其 Ratio 較估計值為高。在 CSTU 的部份，儘管地面風速提高，但是在近地表的風速會因為草地的粗糙長度影響，對風速的影響會更較 PRB 的水泥地為大，因此所能揚起的顆粒量相較於 PRB 會較少，因此其 Ratio 較高。

在區間 3 (Wind speed : 3 ~ 4 m/s) 時，估計值 (1.11) 是低於 PRB (1.49) 與 CSTU (1.28) 的觀察值。當風速達到 3 m/s 以上時，懸浮微粒即會開始明顯的被風揚起，且地表粗糙長度對風速的影響會變小，因此估計值與 CSTU 的 Ratio 會越接近 1，唯 PRB 的 Ratio 較區間二為高，推測可能的原因有兩個，第一個可能是 PU 在較高的風速下，雖然揚起的量增加，但由於風的帶動，使其顆粒的移動距離較遠，較不易被乾沉降板所收集。而另外一個原因，可能是因為 PRB 的水泥地表面，其懸浮微粒的量較 CSTU 為少，所以儘管風速增加，能揚起的顆粒有限，故導致此一情況。

在區間 4 (Wind speed : 4 ~ 5 m/s) 時，估計值 (1.08) 是低於 PRB (0.98) 與 CSTU (0.67) 的觀察值。在這個區間，估計值與 PRB 的 Ratio 均十分接近 1，這表示在達到一定風速的情況下，風力對落下或揚起的顆粒的影響會趨向相等，因此 PD = PU，故其 Ratio 會趨近 1。而 CSTU 因為風速增加，會將草地的土壤大量揚起，因此導致 Ratio 小於 1 的情況。

2.2 Surface Traction (ST) 影響參數的建立

在估計值與觀察值比較的結果發現，當風速增加時，ST 對 Ratio 的影響便會增加。然而在以公式 (6) 的計算中，並沒有考量到 ST 的部份，因此本研究藉由估計值的模擬結果與觀察值之間的差異來建立 ST 的參數。

因為觀察值為實際的採樣值，因此可將公式 (2) 改寫成：

$$\text{Obs. Ratio} = X / Y = X / Y' + ST \quad (16)$$

這裡的 Obs. Ratio 是觀察值的比值、X 是 SA+PD、Y 是 SA+PU+ST 以及 Y' 是 SA'+PU。而其中的 X = 實際採樣的 DWF 以及 Y = 實際採樣的 UWF。

接著我們假設估計值的 PD 等於觀察值的 DWF，而估計值的 PU 則等於 Y'，

即是 $Y' = Y - ST$ 。因此，經過推導之後可得到：

$$C = UWF / \{1 / [(R_{Est.} / R_{Obs.}) - 1] + 1\} \quad (17)$$

這裡的 $R_{Est.}$ 是估計值的 Ratio 以及 $R_{Obs.}$ 是觀察值的 Ratio。

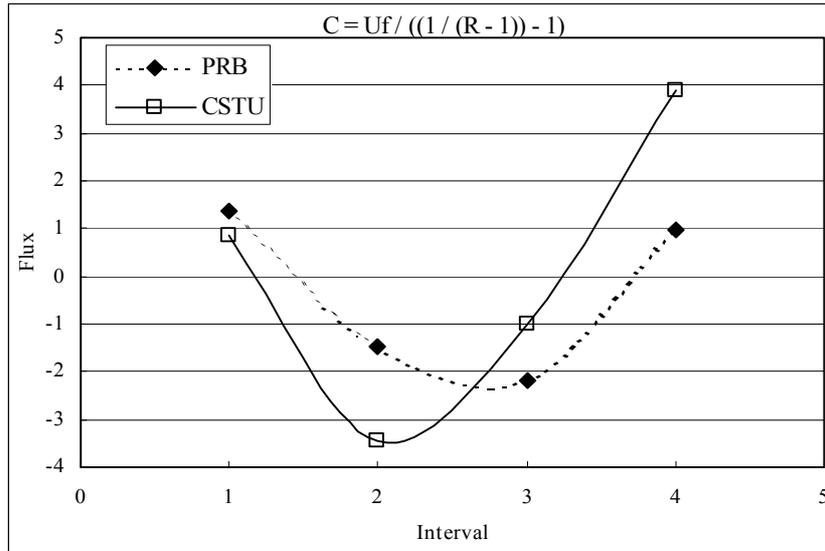
經過公式(17)的計算之後，我們可以得到圖四的結果，圖四是 PRB 與 CSTU 的 ST 值比較。其結果顯示，在不同的風速時，ST 的影響有明顯的不同，並且受地表粗糙長度的影響而有所不同。

在區間 1 (Wind speed : 1 ~ 2 m/s) 時，PRB 的 ST 是 $1.38 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ ，高於 CSTU 的 $0.85 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ 。這表示在低風速的狀況下，PRB 的被風揚起的細微粒的量高於 CSTU，這是因為 PRB 是水泥地的平滑表面，相較於 CSTU 的粗糙草地，PRB 地面上的細微粒更容易被風所帶起。

在區間 2 (Wind speed : 2 ~ 3 m/s) 時，PRB 的 ST 是 $-1.48 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ ，高於 CSTU 的 $-3.43 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ 。這表示風速在 2 ~ 3 m/s 的時候，此時的風雖然能將 PRB 的細微粒揚起，但是卻會因為風速較高而導致細微粒的部份不易被乾沉降板收集到，因此造成負值。另外，PRB 的 ST 值大於 CSTU 的 ST 值，可能的原因是因為草地的粗糙長度較高，而導致風速下降，因此無法將細微粒揚起，所以使得其 ST 值較低。

在區間 3 (Wind speed : 3 ~ 4 m/s) 時，PRB 與 CSTU 的 ST 值比較與區間 1 和 2 是相反的情況，在 PRB 的 ST 是 $-2.18 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ ，低於 CSTU 的 $-0.99 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ 。這個結果顯示，當風速大於 3 之後，在 PRB 的部份，由於風速變大，因此使得顆粒更不易被收集，所以對其 PU 的部份影響變大。在 CSTU 的部份，此時的風速已可將顆粒揚起，但仍因為風的影響導致收集不易，造成 ST 為負值，這個結果可以對照 PRB 在區間 2 的 ST 值可以證明，兩者有相似的情況發生，而 CSTU 因為草地的粗糙度的影響，直到地面風速大於 3 m/s 之後，才有此狀況發生。

在區間 4 (Wind speed : 4 ~ 5 m/s) 時，此時 PRB 的 ST 是 $0.98 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ ，而 CSTU 是 $3.90 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ 。這個結果顯示在此風速之下，兩地都有受到顆粒揚起的影響，使得 ST 值上升，而在 CSTU 的部份，由於草地可揚起較多的顆粒，所以造成 ST 值得上升十分明顯。



圖四：PRB 與 CSTU 的 ST 值比較

3. 結論

1. Dry deposition ratio 主要受到下列幾個因素的影響：
 - (1) 風速
 - (2) 地表覆蓋物種類（粗糙長度）
 - (3) 懸浮微粒被收集的難易度
2. 當風速越大，Ratio 會越小。在粗糙長度小的表面，其比值會趨近於 1；在粗糙長度大的表面，其比值會小於 1。
3. 風速的大小，除了會影響 PU 的量之外，同時也會影響乾沉降板收集 PU 的難易度。風速越大，則顆粒越難被收集到，導致 ST 呈現負值。
4. 估計值與觀察值有相同的趨勢，導致兩者之間有所差異的原因是風速的大小。這個風速的大小，除了影響顆粒上揚的量之外，同時也會影響顆粒被收集的程度。
5. 從本研究來看，在風速為 3 m/s 的情況下，開始會使 PRB 與 CSTU 的結果出現不同的情況，主要是相關到地表的覆蓋物以及可揚起的顆粒量。