

台中港海岸飛砂量推估之探討

黃隆明⁽¹⁾ 吳昌翰⁽²⁾

摘要

本研究之目的在以現地觀測方法從事台中港地區飛砂量之調查，以探討砂粒比重、密度、含水率及風速與飛砂量之關係，研究中以 BSNE 及 H-2 二種不同型式之集砂器，配合多層風速計進行飛砂量與風速之觀測，進而對中島飛砂量之因次分析式加以驗證、比較、探討與分析。

經由線性迴歸分析，綜合研究所得結果得知，風速與飛砂量呈指數極顯著關係，而砂粒密度及中值粒徑則與飛砂量呈負相關；又飛砂量與 0.3 % 極低含水率之砂粒，彼此間並無顯著關係；再者，BSNE 集砂器較 H-2 集砂器之觀測結果更接近中島因次分析推估之飛砂量；將二種不同型式集砂器分析所得之飛砂量推估式，經由率定修正後為：

BSNE 型集砂器：

$$\left(\frac{Q}{d_{50} \times U_{0.2} \times \sigma}\right) = 6.56 \times 10^{-4} \times \left(\frac{U_{0.2}^2}{g \times d_{50} \times \frac{\sigma}{\rho}}\right)^{0.8458} \quad (1)$$

H-2 型集砂器：

$$\left(\frac{Q}{d_{50} \times U_{0.2} \times \sigma}\right) = 2.5 \times 10^{-4} \times \left(\frac{U_{0.2}^2}{g \times d_{50} \times \frac{\sigma}{\rho}}\right)^{0.7214} \quad (2)$$

所得之結果，可提供相關工程規劃之重要參考依據。

(**關鍵詞**：飛砂量、摩擦速度)

A Study on the estimate wind blown sand in Taichung Harbor

Long-Ming Huang⁽¹⁾ *Chang-Han Wu*⁽²⁾

Associate Professor⁽¹⁾, Doctoral Research Fellow⁽²⁾, Department of Soil and Water conservation, National Chung-Hsing University, 250 Taichung, Taiwan, ROC.

ABSTRACT

⁽¹⁾ 國立中興大學水土保持學系副教授

⁽²⁾ 國立中興大學水土保持學系博士班研究生

(通訊作者 E-mail: timberlandwu@hotmail.com)

The purpose of this study proposed herein is to research which understand about grain size, grain density, grain water content, wind velocity and wind blown sand in Taichung Harbor, at one time we observing the wind blown sand and wind velocity by sand sampler and multi-layer anemometer, further, estimates wind blown sand by Kawamura dimension analyze.

The results of data by regression analysis that can be derived by power expression between wind velocity and wind blown sand, the grain size, grain density have negative relationship with wind blown sand, however, grain water content have no relationship with wind blown sand at 0.3% water content, moreover, the BSNE is closed than H-2 to estimates fluctuation of sand dune in Taichung Harbor. Two adjust estimates equation of wind blown sand by

BSNE sand sampler

$$\left(\frac{Q}{d_{50} \times U_{0.2} \times \sigma}\right) = 6.56 \times 10^{-4} \times \left(\frac{U_{0.2}^2}{g \times d_{50} \times \frac{\sigma}{\rho}}\right)^{0.8458} \quad (1)$$

H-2 sand sampler

$$\left(\frac{Q}{d_{50} \times U_{0.2} \times \sigma}\right) = 2.5 \times 10^{-4} \times \left(\frac{U_{0.2}^2}{g \times d_{50} \times \frac{\sigma}{\rho}}\right)^{0.7214} \quad (2)$$

(Key Words: Wind blown sand, BSNE, Wind velocity)

前 言

台灣西北部自北而南有淡水河、頭前溪、後龍溪、大安溪、大甲溪、烏溪、濁水溪、新虎尾溪、朴子溪、八掌溪、集水溪、曾文溪、二仁溪、高屏溪以及林邊溪等溪流，自山區挾帶大量土砂排入海中，成為西海岸淤積之主要砂源(江，1978)。所以本省西部沿海岸有連續性及局部性的大小砂丘。尤其到了台灣冬季東北季風來臨，在強烈的挾砂氣流下，魚塢、田園、道路、濱海遊憩場所常被掩歿；港灣、溪道淤塞，影響海埔新生地之開發及港口之修建，為害甚巨。

探討有關野外飛砂移動之變化，集砂器不外乎是最佳的觀測儀器，野外捕捉飛砂之

集砂器可分為兩類：(1)垂直式。(2)水平式。Bagnold 集砂器(A modified Bagnold sampler)為風洞試驗與現地試驗上最常使用之垂直式儀器，其缺點為固定轉軸，現地觀測時無法收集各方向之飛砂。有鑑於此，美國農業部風蝕實驗室(U. S. Department of Agriculture's Wind Erosion Laboratory)D. W. Fryrear於1986年設計出可隨不同風向而擺動之垂直集砂器，稱為 Big Spring Number Eight(BSNE)；為目前最常用之擺動式集砂器。

水平式無法收集不同高度飛砂且都為固定轉軸，但無擾亂氣流之優點。水平式集砂器以 H-2 型集砂器最常見之，Horikawa 與 H. W. Shen 於 1960 年在風洞中對各種不同型式集砂效率作詳密之研究，並作出集砂器對摩

擦風速之集砂率關係圖，以供參考。

往昔學者都以單一型態集砂器探討當地飛砂量，顯少探討擺動與固定式集砂器於現地實驗上之差異所在；故本研究於台中港北淤沙堤進行擺動與固定式之現地飛砂量收集與分析比較。

台中港夏季(4月~9月)風向以NNE及S向為主，平時風力均小，故土砂不易飛揚；冬季期間受東北季風影響，風向以NNE向為主(佔53.3%)，NE向次之(佔20.6%)，二者佔73%以上，超過15m/sec而延時持續超過2小時及8小時，往往促成大量飛砂運移至下風處，造成定砂構造物與防風林掩埋，進而失去其功能性。為解決此天然災害，相關的飛砂現地試驗勢必顯得重要。

前人研究

1. 風速垂直分佈

一般風速之垂直分佈理論大都以Prandtl之對數法則為依據，即大氣在中立狀態下風速U與高度Z有下列關係式：

$$U = 5.75 \times U_* \log \frac{Z}{Z_0} \quad (1)$$

(1)中 U_* 為摩擦風速， Z_0 為粗糙長度，而粗糙係數與砂粒粒徑d有以下之關係：

$$Z_0 = 0.081 \times \log \frac{d}{0.18} \quad (2)$$

Bagnold 根據(1)式在風洞內測定飛砂時，修正風速垂直分佈之公式為：

$$U = 5.75 \times U_*' \log \frac{Z}{k} + U_t \quad (3)$$

(3)式中 U_* 為飛砂發生時之摩擦速度，通常在砂面條件相同時，同一風力強度下，有飛砂發生時之 U_*' 及無飛砂發生時之 U_* 兩者應相同，而 U_t 為門檻值風速(threshold velocity)，依Bagnold所述，在有飛砂發生時各不同強度之風速垂直分佈繪在半對數座標時，各風速分佈直線大致交於一點，此點稱之為焦點，該焦點之風速座標即為 U_t ，高度對數座標即為 k' ，該高度即為門檻值風速(threshold velocity) U_t 所發生之高度。

2. 飛砂量與高度

風洞試驗之飛砂量與高度關係式，一般均呈指數性關係(Z. Dong, 2002)，而野外之飛砂量與高度之關係式，則以修正後之乘冪指數相關性最高(Van Donk and Skidmore, 2001)。

$$Q(Z) = a(Z+1)^b \quad (4)$$

3. 飛砂量推估式

Bagnold 依據動量不滅定律，導出飛砂量公式為：

$$Q = C \sqrt{\frac{d}{D}} \times \frac{\rho}{g} \times U_*^3 \quad (5)$$

(5)式中Q為單位時間通過一單位斷面之飛砂量，C依砂粒條件而定之常數，當砂粒屬於均勻分佈時， $C=1.5$ ；屬自然分級時， $C=1.8$ ；砂粒分佈範圍較大時， $C=2.8$ 。d為中值粒徑，D為標準粒徑，即 $D=0.25mm$ 。 ρ 為空氣密度，g為重力加速度， U_* 為摩擦速度。

江(1978)利用該公式推算其桃園一帶之飛砂量以及游(1986)推算其濁水溪河口之飛

砂量亦有高估與低估之情形；其發生之原因，除飛砂量公式之推演在理論上不十分周詳外，試驗材料與方法之背景不同，都可能造成上述之問題。

中島以因次分析(Dimensional analysis)之方式推導出飛砂量之關係式為：

$$\frac{Q}{d_{50} \times U_* \times \sigma} = M_1 \left(\frac{U_*^2}{g \times d_{50} \times \sigma / \rho} \right)^\alpha - M_2 \quad (6)$$

(6)式中 d_{50} 為中值粒徑， σ 為土砂密度， M_1 、 M_2 、 α 為實驗常數。

中島試驗結果其 α 值為 0.8，因之，上式之 Q 值為 0 之條件下，可推求 U_* 之大小，此值即可用來代表該中值粒徑之門檻值風速(threshold velocity)。亦即：

$$U_t = \sqrt{\left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{1.25} \times g \times d_{50} \times \frac{\sigma}{\rho}} \quad (7)$$

研究材料與方法

1. 研究試區

(1) 地理位置

目前飛砂搬運的主要發生地區有兩處：一是在北防波堤北側的淤積灘地往南越過北防砂堤進入所謂「漂飛砂整治區(I)」，亦是本研究試區主要觀測位置，面積約為 50 ha，如圖 1 所示。

(2) 氣象條件

a. 氣溫

平均氣溫以 6~9 月最高，其中以 7、8 月平均氣溫最高(平均 28.9°C)，氣溫之季節性變化與台灣全區類似，全年氣溫平均值為

23.3°C。

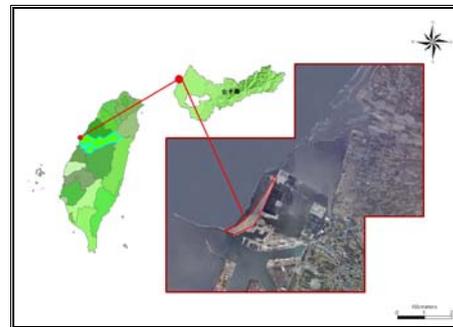


圖 1 研究地區圖

Figure 1 Site of study area

b. 氣壓

梧棲地區年平均氣壓為 1009.9 毫巴，其中以 12 月之月平均氣壓為最高，顯示此區受東季之西伯利亞分裂高壓影響，而夏季為太平洋高壓影響之副熱帶氣候型態。

c. 風速與風向

台中港全年盛行風為北北東風，出現頻率超過 66%，5~8 月以南南東風為主，風速較其他月份微弱；本研究時間於民國 94 年 10 月至 95 年 1 月份，除了夏季 6 月~9 月吹南南風居多，其餘都以北北西風向為主，全年亦是北北西出現頻率最多。

d. 雨量與蒸發

全年累積雨量平均為 1353.1 mm，全年累積蒸發量平均為 1533.6 mm；冬季則如同台灣南部一般，較為乾燥。

e. 雲量與相對濕度

雲量及相對濕度月變化不大，平均相對濕度約為 74.8~79.8%之間，年平均相對濕度

為 77.7%，而雲量平均約為 4.3~7.3 之間，以 10 月之 4.3 為最低，3 月之 7.3 為最高，全年平均為 5.9。

2. 研究方法

(1) 風速與風向之觀測

如圖 2 所示，在砂面上架設多層風杯風速計，其剖面高度分別為 0.2 m、0.5 m、1 m、1.5 m、2 m 等 5 處 10 分鐘之平均風速。將所觀測之資料利用最小平方法求出迴歸式及相關係數 r ，則可利用相關係數之顯著性判定其迴歸式之意義，以便瞭解風速垂直分佈之特性，並推算各風速之摩擦速度 U_* 與粗糙長度 Z_0 。

(2) 飛砂量之觀測

a. BSNE 集砂器

早期 Bagnold 型垂直集砂器(Bagnold sampler)常因妨礙氣流之通過，並容易在儀器前造成渦流之現象，大大降低集砂效率，且



圖 2 多層風速計
Figure 2 The multi-layer anemometer of wind velocity

有不能隨著風向改變角度；為改善此缺點，美國農業部(USDA)D. W. Fryrear 於 1986 年設計出 BSNE，不但可以降低渦流產生，提高集砂效率，如圖 3 所示。

b. H-2 型集砂器

水平集砂器，尤以 Horikawa 和 Shen(1960) 所作之 H-2 型最常被使用，其優點為無擾亂氣流，但無法收集各剖面之飛砂量，本研究使用 H-2 型水平集砂器，並加以改良，提高觀測精確度，如圖 4 所示。



圖 3 BSNE 集砂器
Figure 3 BSNE sampler

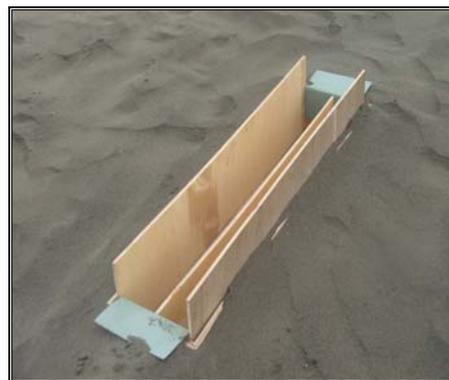


圖 4 H-2 型集砂器
Figure 4 H-2 sampler

(3) 砂粒之粒徑分析

將集砂器捕獲到的飛砂風乾後，進行篩分析；篩網分別為 # 4、# 10、# 20、# 40、# 60、# 100、# 140、# 200 等篩號，於 1/1000g 精度之電子天秤稱重，求出 d_{50} 。

(4) 砂粒之含水率之分析

觀測飛砂量同時，採取迎風面上表層 1~2 mm 之砂樣置入密封袋，並攜回試驗室，以烘乾法測定砂體之含水率。

(5) 砂粒之比重分析

取集砂器部份砂樣 15 g，以比重瓶分析其飛砂之比重，並由該比重可換算其砂粒密度 σ 。

(6) 空氣密度

觀測飛砂量同時，並記錄當時氣溫、氣壓及相對濕度，求出空氣密度。

結果與討論

1. 風速之特性

往昔學者文獻探討飛砂量之影響因子時，大都以摩擦風速 U_* 代表之(Bagnold, 1954; 河村, 1951; 江, 1978; 中島, 1979)，此一因子誠然是表示風速垂直變化之最好指數，惟本實驗之資料於野外觀測所得，常有陣風間歇性之出現，易造成氣流之不穩定，故較高之摩擦風速是否有較高風速之存在，乃是值得探討之問題(游, 1989)。

為進一步探討此問題，本研究以 0.2 m 高度之風速為因子，此因飛砂移動傳輸量之高

度大致發生在 0.3 m 範圍內 (Z. Dong, 2002)，故置於多層風速杯 0.2 m 高度所觀測之風速，可能影響飛砂量之傳輸有極大之影響，並與摩擦風速進行相關分析，如表 1 所示；可知，本研究試區之高度 0.2 m 風速與摩擦風速並無顯著相關性可言，亦即有較高之摩擦風速，並不一定有較高之風速存在，故本研究取 0.2 m 高度之風速作為影響飛砂量之因子。

表 1 風速與摩擦風速相關矩陣

Table 1 Relation between matrix of wind velocity and friction wind velocity

Pearson 相關矩陣分析		
	$U_{0.2}$	U_*
$U_{0.2}$	1	-0.34
U_*	-0.34	1

2. 飛砂量之定性分析

本研究收集飛量之儀器分別為 BSNE 集砂器與 H-2 型集砂器，同步與多層風速計架設，為考慮到陣風性之影響，每 10 分鐘一測回，兩組儀器觀測日期分別為，2005 年 12 月 3、4 日(BSNE)，2005 年 12 月 4 日、2006 年 1 月 20 日(H-2 型)。

(1) 風速與飛砂量之關係

a. BSNE 集砂器

依前述風速特性之分析，本研究試區 0.2m 高度所測得最高之摩擦風速值，該風速值未必為最高；依本研究試區來看，迎風面有防砂籬阻擾，易改變真實砂面上摩擦風速，故不能以摩擦風速代表風速之特性，爰此以 0.2 m 高之風速與實測飛砂量進行逐步回歸分析。經由逐步回歸分析後，得知其相

關性呈極顯著指數關係為最佳，如圖 5 所示：

$$Q = 0.0115U_{0.2}^{2.6437} \quad r = 0.928^{**}$$

式中 Q ：飛砂量 (g / m-sec)

$U_{0.2}$ ：0.2 m 高度之風速 (m / sec)

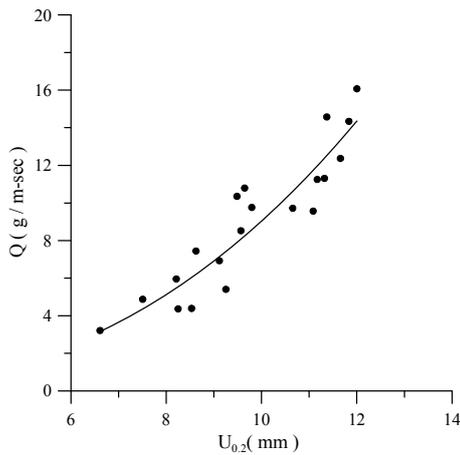


圖 5 風速與飛砂量之關係

Figure 5 Relation between wind velocity and aeolian sand

b. H-2 型集砂器

將 H-2 型集砂器所收集之飛砂量與風速作逐步回歸分析，如圖 6 所示，亦呈極顯著指數關係較佳，如下：

$$Q = 0.5911U_{0.2}^{0.2697}, \quad r = 0.8471^{**}$$

式中 Q ：飛砂量 (g / m-sec)

$U_{0.2}$ ：0.2 m 高度之風速 (m / sec)

(2) 砂粒大小與飛砂量之關係

a. BSNE 集砂器

將集砂器裡之砂粒經由篩分析動作，求

出 d_{50} ，並與飛砂量進行逐步回歸分析，其關係式與顯著性如下：

$$Q = -77.999d_{50} + 25.304, \quad r = 0.4082^*$$

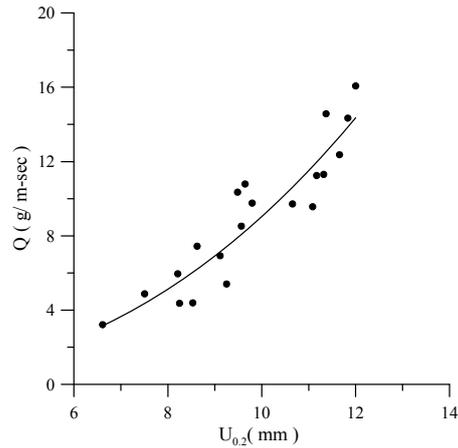


圖 6 風速與飛砂量之關係

Figure 6 Relation between wind velocity and aeolian sand

式中 Q ：飛砂量 (g / m-sec)

d_{50} ：中值粒徑 (mm)

上式中，顯示出粒徑與飛砂量之關係為負相關，其粒徑遇大，飛砂量有減少之趨勢；並由圖 7 得知集砂器所收集到之飛砂量中值粒徑大約在 0.22~0.26 mm 範圍內。

b. H-2 型集砂器

將飛砂量與砂粒粒徑 d_{50} ，經由逐步回歸分析後，得知其粒徑大小與飛砂量呈一線性負相關：

$$Q = -97.652d_{50} + 36.5, \quad r = 0.468^*$$

式中 Q ：飛砂量 (g / m-sec)

d_{50} ：中值粒徑 (mm)

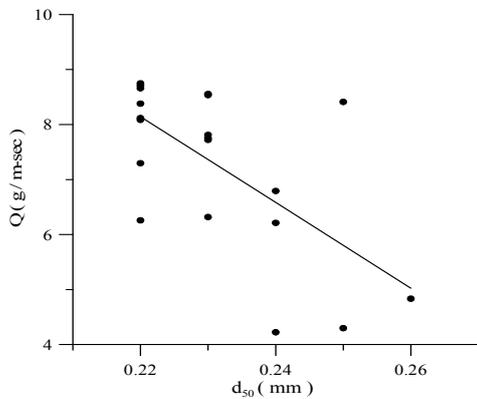


圖 7 Q 與 d_{50} 之散佈圖

Figure 7 The distribution diagram of relation between Q and d_{50}

中值粒徑之分佈範圍在 0.24~0.32 mm 範圍內，如圖 8 所示，明顯大於 BSNE 之中值粒徑；其因為 H-2 型集砂器與地面平行橫躺於砂面上，可收集到滾動或粒徑較大而不易產生跳躍之砂粒。

BSNE 因屬於垂直擺放，最低收集口離地面高 5 cm 處，所收集之砂粒粒徑均屬較小且易發生跳躍之運動；粒徑較大之顆粒應以滾動為主要運動型態，故無法被 BSNE 型所收集到。由於飛砂在移動過程中，滾動量極少，故可忽略其量 (Bagnold, 1954)。

(3) 砂粒密度與飛砂量之關係

a. BSNE 集砂器

為得知集砂器裡之砂粒密度，利用比重瓶試驗分析之，並與飛砂量進行逐步回歸分析，其關係式如下：

$$Q = -10.767\sigma + 32.095, \quad r = 0.779^{**}$$

式中 Q : 飛砂量 (g / m-sec)

σ : 砂粒密度 (g / cm³)

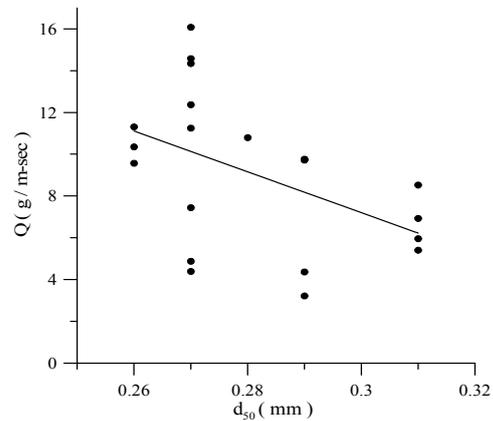


圖 8 Q 與 d_{50} 之散佈圖

Figure. 8 The distribution diagram of relation between Q and d_{50}

圖 9 顯示，其密度之範圍在 2.1~2.6 g/cm³；由於砂粒之主要來源大多由大甲溪所供應，而上游之岩層錯綜複雜，主要以石英砂岩等構成，因捕獲到之飛砂量密度不同，乃為砂粒材料組成不同。

進一步探討，由上式可知飛砂量與砂粒密度之線性關係呈負相關；造成此現象之原因，經由現地觀察發現，係在高風速之風力條件，密度較低之砂粒易受顆粒互相撞擊後，經風力作用進行跳躍運動方式進入各剖面高度之集砂器內，低風速狀況下，砂粒與砂粒間之碰撞情形明顯減少，故 10 cm 以上之集砂器飛砂量急劇減少。

b. H-2 型集砂器

經由線性回歸分析，其關係式如下：

$$Q = -15.017\sigma + 44.656, \quad r = 0.115$$

式中 Q ：飛砂量 (g / m-sec)

σ ：砂粒密度 (g / cm³)

由圖 10 得知，砂粒密度分佈狀況與 BSNE 略同，範圍在 2.1~2.7 g/cm³，不受集砂器型態不同而改變；另一方面，砂粒密度與其飛砂量呈負相關。進一步推測，其 H-2 型構造為單一容器，無法表現出各水平距離之飛砂量多寡；故在砂粒起動狀況下，不同性質之砂粒密度大多均落於集砂器中。

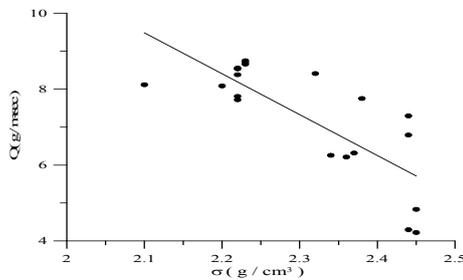


圖 9 Q 與 σ 散佈圖

Figure. 9 The distribution diagram of relation between Q and σ

(4) 砂粒含水率與飛砂量之關係

a. BSNE 型集砂器

經線性迴歸分析後，其相關性如下：

$$Q = -9.8149\omega + 8.4701, \quad r = 0.115$$

式中 Q ：飛砂量 (g / m-sec)

ω ：含水率 (%)

由上式可知，飛砂量與含水率呈線性負相關，並不顯著；亦砂粒含水率介於 0.1~0.16 %時，與飛砂量無線性相關。

b. H-2 型集砂器

經由線性迴歸分析，得知其砂粒含水率與飛砂量呈線性負相關：

$$Q = -60.817\omega + 17.681, \quad r = 0.236$$

式中 Q ：飛砂量 (g / m-sec)

ω ：含水率 (%)

根據林 (1979) 之實驗結果，含水率小於 1.2 % 以下時，在風速相同之條件下，飛砂量與含水率無關。本研究觀測時之砂粒含水率均低於 1.2 %，其飛砂量與砂粒含水率雖以負相關趨勢存在，未達顯著水準；再者，本研究觀測期間，砂粒因受太陽日照許久，呈現乾燥狀態，爰此，本次研究不考慮砂粒含水率對飛砂量之影響。

3. 飛砂量之推估

飛砂量之推估式大多是以風洞實驗所推導之式子，其中較著名的 Bagnold(1954)、河村(1951)、Zingg(1953)等，而中島(1979)則以因次分析之方式推導另一飛砂量公式，以綜合 Bagnold 與河村兩公式而彌補該二公式之缺點。前述所提到都是早期之公式，而近期之飛砂量公式也都以室內風洞實驗為主，飛砂量公式以 Bagnold 推估式加以修正 (Sorensen, 1991, Z. Dong, 2003)。風洞試驗所推導之飛砂量公式是否適用於台灣海岸飛砂乃值得探討，游繁結(1989)於濁水溪河口架設改良式 H-2 型集砂器觀測飛砂量，並利用中島公式推估濁水溪河口飛砂量。

(1) 中島因次分析推估式

由前述所探討之各因子與飛砂量之關係得知，0.2 m 風速與飛砂量呈指數關係，砂粒中值粒、砂粒密度與飛砂量呈反比關係，又

砂粒水分與飛砂量無關，故可將中島之公式改寫成：

$$\left(\frac{Q}{d_{50} \times U_{0.2} \times \sigma}\right) = F\left(\frac{U_{0.2}^2}{g \times d_{50} \times \sigma / \rho}\right) \quad (8)$$

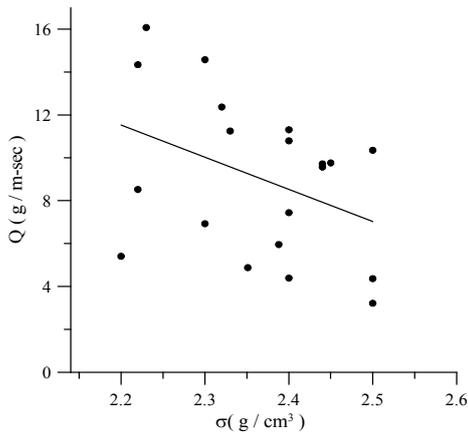


圖 10 Q 與 σ 散佈圖

Figure 10 The distribution diagram of relation between Q and σ

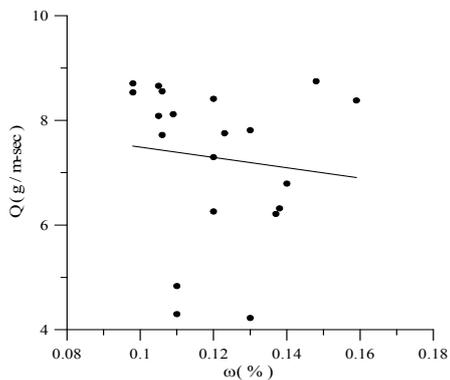


圖 11 Q 與 ω 散佈圖

Figure 11 The distribution diagram of relation between Q and ω

a. BSNE 型集砂器

經由最佳化逐步回歸分析與相關分析可得下式，如圖 13 所示，即：

$$\left(\frac{Q}{d_{50} \times U_{0.2} \times \sigma}\right) = 7 \times 10^{-5} \times \left(\frac{U_{0.2}^2}{g \times d_{50} \times \sigma / \rho}\right)^{0.8} \quad (9)$$

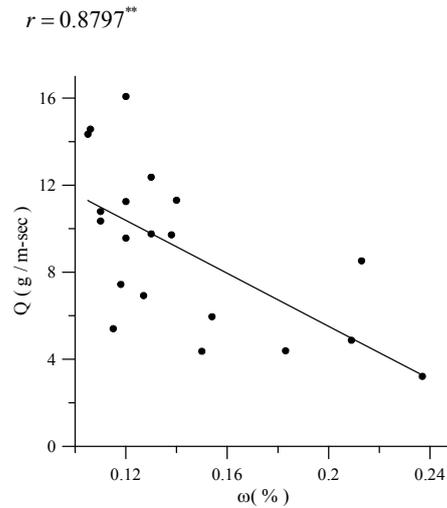


圖 12 Q 與 ω 散佈圖

Figure 12 The distribution diagram of relation between Q and ω

BSNE 之設置方式與地面垂直，最低收集口無法收集到低於 5cm 以下之飛砂量，故上式必須加以修正，本研究參考 Stout and Zobeck (1996) 於海岸地進行飛砂量觀測所做之修正係數，中值粒徑低於 2.5 mm，此時高度 0.1 cm 每秒單位寬度飛砂量為高度 5 cm 收集口之 7.5 倍，而滾動量為總體飛砂量之 1/4。故式可修正成：

$$\left(\frac{Q}{d_{50} \times U_{0.2} \times \sigma}\right) = 6.56 \times 10^{-4} \times \left(\frac{U_{0.2}^2}{g \times d_{50} \times \frac{\sigma}{\rho}}\right)^{0.8} \quad (10)$$

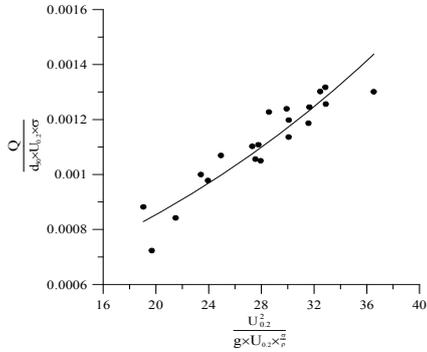


圖 13 $(\frac{Q}{d_{50} \times U_{0.2} \times \sigma})$ 與 $(\frac{U_{0.2}^2}{g \times d_{50} \times \sigma / \rho})^{0.8}$
 Figure 13 $(\frac{Q}{d_{50} \times U_{0.2} \times \sigma})$ and $(\frac{U_{0.2}^2}{g \times d_{50} \times \sigma / \rho})^{0.8}$

b. H-2 型集砂器

藉由迴歸分析與相關分析可得下式，如錯誤! 找不到參照來源。所示，即：

$$\begin{aligned} & (\frac{Q}{d_{50} \times U_{0.2} \times \sigma}) \\ &= 2 \times 10^{-4} \times (\frac{U_{0.2}^2}{g \times d_{50} \times \frac{\sigma}{\rho}})^{0.7214} \quad (11) \end{aligned}$$

$$r = 0.799^{**}$$

H-2 型設置方式與砂面平行，故垂直剖面高度飛砂量無法收集到，而游（1989）於濁水溪河口測得剖面高度之懸浮量為滾動與跳躍之 1/4，故上式可修正成：

$$\begin{aligned} & (\frac{Q}{d_{50} \times U_{0.2} \times \sigma}) \\ &= 2.5 \times 10^{-4} \times (\frac{U_{0.2}^2}{g \times d_{50} \times \frac{\sigma}{\rho}})^{0.7} \quad (12) \end{aligned}$$

(2) 飛砂量之推估與驗證

現地之堆砂量利用全測站測量儀器測得，測量之日期分別為 2005 年 11 月，如圖 15 所示，與 2006 年 1 月，如圖 16 所示將堆積扣除侵蝕，即是堆砂量，如

表 2 所示。

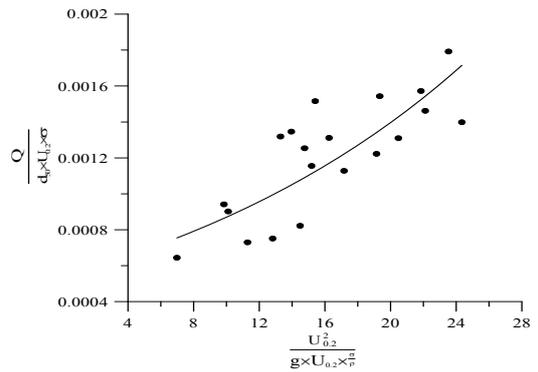


圖 14 $(\frac{Q}{d_{50} \times U_{0.2} \times \sigma})$ 與 $(\frac{U_{0.2}^2}{g \times d_{50} \times \sigma / \rho})$
 Figure 14 $(\frac{Q}{d_{50} \times U_{0.2} \times \sigma})$ and $(\frac{U_{0.2}^2}{g \times d_{50} \times \sigma / \rho})$

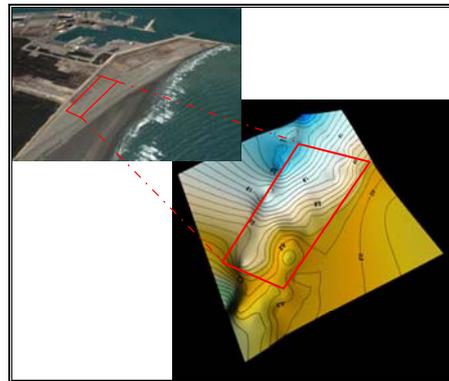


圖 15 2005 年 11 月份堆砂量

Figure 15 A mass of sand dune on Nov.2005

本研究將 BSNE、H-2 利用中島推估式推估之飛砂量與風洞所推求得之飛砂量，三者比較之，如錯誤! 找不到參照來源。所示，其

三者中,BSNE 利用中島所推求之飛砂量最接近現地堆砂狀況,而風洞試驗所推估之飛砂量明顯高估。

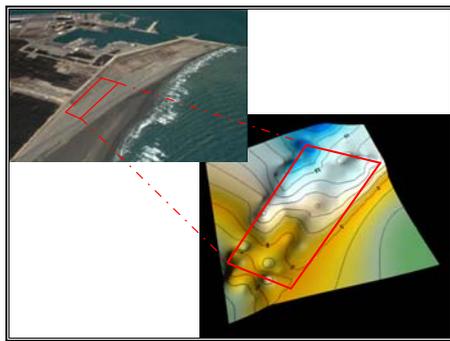


圖 16 2006 年 1 月份堆砂量
 Figure 16 A mass of sand dune on Jan.2006

表 2 現地堆砂量
 (2005 年 11 月~2006 年 1 月)
 Table 2 The field of sand dune mass
 (Nov.2005~Jan.2006)

堆積	侵蝕	堆砂量
163.48	59.54	104.04

註：(m³/m-winter)

為瞭解此差異,將三者每月所推求之飛砂量與風速繪製成對數圖,如圖 17、圖 18、

圖 19 所示。顯示出,風洞試驗推估式之斜率較陡,而平均風速小於 5.32 m/sec 時,飛砂量呈負值且近似 0,即無飛砂量之發生,一旦風速大於 5.32m/sec,其飛砂即起動;而 11 月所求之飛砂量近似 BSNE 所推估之量,主要是日平均風速超過 2/3 之天數都低於風速 5.32m/sec,而 12 月份與 1 月份之日平均風速超過 5.32m/sec 將近 15 天之多,故造成飛砂

量高估,尤上述可知,風洞所推求之飛砂量一般都會高估其現地飛砂量。

H-2 型所推求之飛砂量為 14.671 m³/m-winter,與台加工程顧問有限公司於

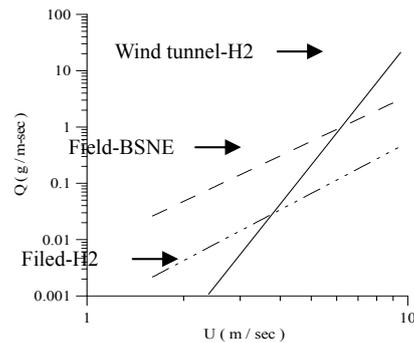


圖 17 2005 年 11 月份風速與飛砂量之對數圖
 Figure 17 The log diagram of wind velocity and aeolian sand on Nov.2005

表 3 飛砂推估量
 (2005 年 11 月~2006 年 1 月)
 Table 3 A estimate of aeolian sand
 (Nov.2005~Jan.2006)

	Total
BSNE	89.902
H-2	14.671
H-2 (風洞試驗式)	305.537

註：單位(m³/m-month)

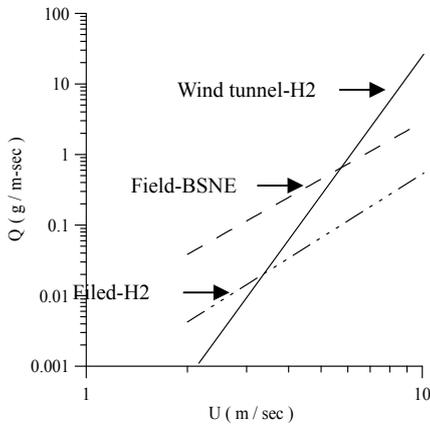


圖 18 2005 年 12 月份風速與飛砂量之對數圖

Figure 18 The log diagram of wind velocity and aeolian sand on Dec.2005

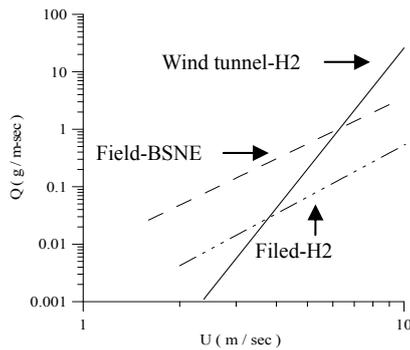


圖 19 2006 年 1 月份風速與飛砂量之對數圖

Figure 19 The log diagram of wind velocity and aeolian sand on Jan.2006

2003 年利用直立固定式集砂器所推求的飛砂量 14.3 m³/m-winter 一樣，而兩者之集砂器型態都屬固定式，其所推估之飛砂量都低於現地之堆砂量；故由上述可之，BSNE 因能隨風向轉動而收集不同方向之飛砂量，而提高了台中港飛砂量之推估。

結論與建議

1. 本研究試區 0.2m 高度所測得最高之摩擦風速值，該風速非最高值；依本研究試區來看，迎風面有防砂籬阻擾，易改變真實砂面上摩擦風速，故不能以摩擦風速代表風速之特性。
2. 捕獲之飛砂量中值粒徑一般都介於 0.22 ~ 0.26 mm，中值粒徑與飛砂量呈負相關。
3. 台中港上游之岩層為頭嵛山層、上新世之卓蘭層及錦水頁岩層，有頁岩、石英砂岩等，故造成現地之平均砂粒密度不同。
4. 本研究觀測期間，砂粒因受太陽日照許久，呈現乾燥狀態，爰此，本次研究不考慮砂粒含水率對飛砂量之影響。
5. 本研究飛砂量之推估如下：

BSNE：

$$\left(\frac{Q}{d_{50} \times U_{0.2} \times \sigma}\right) = 6.56 \times 10^{-4} \times \left(\frac{U_{0.2}^2}{g \times d_{50} \times \frac{\sigma}{\rho}}\right)^{0.8}$$

H-2：

$$\left(\frac{Q}{d_{50} \times U_{0.2} \times \sigma}\right) = 2.5 \times 10^{-4} \times \left(\frac{U_{0.2}^2}{g \times d_{50} \times \frac{\sigma}{\rho}}\right)^{0.7}$$

6. 影響飛砂量之因子頗多，加上風向不定時之轉變與陣風性之干擾，故推求野外飛砂量建議使用中島之因次分析推估式。

參考文獻

1. 江永哲、張文詔(1978)，「海岸飛砂量估

- 算之風洞試驗」，中華水土保持學報，第九卷，第二期，第 55-81 頁。
2. 林信輝、江永哲(1979)「砂體含水量與飛砂量之關係試驗」，中華水土保持學報，第十卷，第二期，第 173-193 頁。
 3. 游繁結(1986)「台灣西海岸飛砂量推估之初步研究」，中華水土保持學報，第十七卷，第一期，第 107-117 頁。
 4. 游繁結(1989)「濁水溪河口飛砂量之調查研究」，中華農林學報，第三十八卷，第一期，第 75-104 頁。
 5. Bagnold, R.D.(1954), The Physics of Blown Sand and Desert dunes. Mathuen, &Co., Ltd.
 6. D. W. Fryrear(1986), "A field dust sampler," Journal of Soil and Water Conservation, 41(2) : 117-120.
 7. Stout ,J. E. and Zobeck TM.(1996), " The Wolfforth field experiment," A wind erosion study, Soil Science 161 (9) : 616-632.
 8. Sorensen, M.(1991), "An analytical model of wind-blown sand transport. Acta Mechanica. Supplementum 1," 67-82.
 9. Van Donk, SJ, Skidmore, EL.(2001), "Field experiments of evaluating wind erosion models," Annals of Arid Zone 40(3) : 281-302.
 10. Zingg, A. W.(1953a), Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material,Proceeding of the 5th Hydraulics Conf. Bull, 34: 111-35. Inst. of Hydraulic.
 11. Zhibao D.(2002), "The flux profile of ablowing sand cloud : A wind tunnel investigation," Geomorphology, 49 : 219-230.
 12. Zhibao D.(2003), "Aeolian sand transport : A wind tunnel model," "Sedimentary Geology,161 : 71-83.
 13. 中島勇喜(1979)「飛砂制御に關する基礎的研究」，九州大學農學部演習林報告 51 : 125-183.
 14. 河村龍馬(1951)「飛砂の研究」，東京大學理工研報，5 : 3-4.

99 年 08 月 18 日收稿

99 年 08 月 29 日修改

99 年 08 月 30 日接受