

淺水區拖曳係數參數化之研究

丁傳文 陳曉華

海軍氣象中心

摘要

由於近日近岸活動的增加，實有必要準確的探討氣水交互作用間之動量傳送。事實上在深海區已有許多的風切模式被提出研究，一般認為拖曳係數與風速有直接的關係；然而在淺水區中探討拖曳係數卻少曾於文獻中提出，因此本研究將針對淺水區拖曳係數參數化值探討拖曳係數與風速的關係。研究重點則著重於海上現場之量測實驗，並與文獻中各風切模式相比較。實驗結果顯示出拖曳係數與風速($C_D = 1.3344 + 0.0173U_{10}$)呈現幾乎為獨立關係；而資料顯示拖曳係數與風速突然增強有關，進一步探討陣風或天氣系統變化與拖曳係數關係之研究為本實驗所建議。

一、前言：

氣水介面間之動量傳送對大氣與海洋預報模式，以及海洋環境工程等研究是非常重要的。因為風將動量傳輸於海洋，而使得波浪成長並驅動洋流，雖然氣水動量傳送已被研究數十年，然而其研究結果卻十分之歧異。為提升各種數值模式準確性，實有急切之必要來探討氣水動量傳送以滿足波浪模式、大氣模式、海洋衛星遙測以及海洋生物、化學模式之需求。事實上，因精準量測風切(wind stress, τ)的實驗非常不易，故提出以參數化法來研究氣水動量間傳送之問題。

由過去數十年來在廣大海洋面氣水動量傳送研究中得知風速是拖曳係數(drag coefficient or wind-stress coefficient, C_D)的主要參數，而一些合理拖曳係數值也直接的廣用在各數值預測模式(如 WAM 模式, HASSELMANN et al. 1988)；然而若直接將這些參數應用於淺水之環境中，仍有待實驗來驗證。事實上在近岸淺水對風切研究仍有待確認。因之本研究著重於近海中探測氣水動量傳送並討論拖曳係數參數化之結果。

如圖一所示；在過去數十年中，研究氣水交

介面之拖曳係數者，大多數認為拖曳係數與風速有關；在風速大於水流流速狀況下，風切值以貼海水表面最大並依對數分布(logarithmic profile)而向上遞減，其關係式如下(吳京 1968)：

$$\frac{U_z}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

U_z 是離水面 z 米高度測得之平均水平風速， u_* 是摩擦風速，而 κ 是 VON-KARMAN 常數； z_0 是混合長度(roughness length)。 U_z 可於對數分布中之等通量層(constant flux layer)測得之。因等通量層為發展良好之亂流且其風切值為一常數 TENNEKES(1973)。一般來說等通量層之高度可由數米至高風速下可達數十米間(GEERNAERT 1990)。

氣水介面間之動量傳送可籍由風切來傳送，並可由 Eddy-correlation 法量測得之。此法被認為是最直接且準確的方法之一(BLANC et al. 1989)；其關係式如下：

$$\tau = -\rho \overline{u'w'} = \rho u_*^2 \quad (2)$$

ρ 為空氣密度， $\overline{u'w'}$ 為水平及垂直之平均風速擾動，負號為向下之動量傳送。

風切亦可以一無因次方式表達之，即是以拖曳係數來表現之，其關係式如下：

$$C_z = \frac{\tau}{\rho U_z^2} = \frac{u_*^2}{U_z^2} \quad (3)$$

C_z 即為於離水面 z 米高度所量測到之拖曳係數值；將 1 式與 3 式合併即可得：

$$C_z = \left[\frac{\kappa}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \right]^2 \quad (4)$$

一般來說風速儀的高度均會設定於 10 米或換算為 10 米高度以利於比較拖曳係數之大小，因之將 10 米高度代入 4 式可得 10 米之拖曳係數(C_{10})並以以下式表示之：

$$C_{10} = \left[\frac{\kappa}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)} \right]^2 \quad (5)$$

由 5 式中可知拖曳係數為混合長度的函數。氣象學家一般以混合長度來討論邊界層，而海洋學者則多討論拖曳係數對風切之關係，事實上二者是一體兩面的等價關係。

由圖一可知拖曳係數可以以下式表示之即

$$C_{10} = (a + b \cdot U_{10}) \times 10^{-3} \quad (6)$$

上式中之 a 與 b 均為實驗所得之經驗常數，其中以吳京(1980)綜理了 33 組外海獨立實驗量測之資料，即 $a=0.80$ 及 $b=0.065$ 最具代表性。

於 6 式中雖已完全表達拖曳係數之關係，但是近些年來的研究顯示出(DONELAN (1982), GEERNAERT et al.(1986), 及 SMITH(1980))，實驗量測地點由 59 米至 10 米水深中(如圖二所示)，其所量測到的拖曳係數不但隨風速增加而增加，且拖曳係數亦隨著水深減少而明顯增加，近日研究中更指出圖一中的拖曳係數值之差異可達兩倍，扣除一些已知誤差及量測方法異同仍有 30% 未知數尚待探討(DONELAN 1982)，因之給予了我們有此動機研究淺水區拖曳係數變化情形。

二、實驗方法概述：

本實驗之目的即在探尋一準確之拖曳係數以利近海各種模式之發展；故於美國東岸德拉瓦州德拉瓦海灣中之一方向標示平台上現場實驗以量取海洋及氣象資料，該平台水深四米(如圖三所示)，平台上設有三維超音波測風速儀、流速計、電容式波高計、空氣溫度計、海水溫度計、攝影機組等儀器，採樣頻率 20Hz，連續取 20 分鐘資料平均後為一組資料並進行分析。資料時間則在 1995 年 8 - 10 月採得。經一系列外海實驗，共採取 264 取資料，其中由監視器上查知為非正常外力因素干擾者(如船隻通過)則不取用該組資料，扣除後剩餘資料後共為 112 組資料可進行分析。

三、資料分析：

圖四為一組較完整時間序列資料，由其中可知本實驗量測之因子為：高度風速值(U_z)、摩擦風速值(u_*)、潮水位高度值(z)、水流流向(C_x, C_y)、空氣溫度(T_a)、海水水溫(T_w)、顯著波高(ζ)、波陡(wave steepness, H/L)、波齡(wave age, C_b/u_*)、拖曳係數及混合高度。由圖上明顯的顯示了各項參數值間的相關及資料之可靠度。為取得平衡點以比較各資料間關係，風速、波齡及拖曳係數均依公式 1 轉換為 10 米之標準高度值。

圖五為本實驗拖曳係數對 10 米風速關係之結果，圓形符號為本實驗取之所有資料，而實線則為吳京(1980、1994)所推導出來之關係式，虛線則為 LARGE AND POND (1980) 實驗所得之經驗公式，在水深 4 米下依波的射散關係(dissipation relation)，波的相速最大可為 6.3m/s，因之為考慮氣水分流(air flow separation)的狀況下，實驗資料之取用宜考量在風速值大於 6.3m/s 的實驗資料較合理，因在低風速下除了受到氣水分流關係影響外，氣水間之熱量及能量傳送也較為明顯。因此由分析之資料做回歸分析所推導出拖曳係數經驗關係式為(如圖七所示)：

$$C_{10} = (1.3344 + 0.0173 \cdot U_{10}) \times 10^{-3} \quad (7)$$

由此一經驗關係式來看，拖曳係數幾乎與風速成獨立關係；此式則與曾若玄(1994)台中外海所量

測之資料近似(如圖六所示),且均與風速幾乎成獨立關係。

四、討論：

(一)、由圖八之資料顯示出將本實驗所得之摩擦風速值套入各家經驗公式中仍以吳京之關係式較為準確，而圖中亦顯示了 DONELAN 關係式偏高於本實驗結果而 LARGE AND POND 則較低本實驗結果，細查各實驗數值得知水淺時確有較大之 u_* 值，而深水中所得之 u_* 則較為小，然而本實驗所處之地點水深僅 4 米理應較其他人之經驗公式為高，其原因可能受到了海水狀態(sea state)所影響。而本實驗資料經謹慎取得，故與吳京之經驗公式較為接近，主因係該經驗公式所處理之實驗資料大多來自近岸淺水地區之故。

(二)、由圖二之時間序列圖中可知，當 20 分鐘之平均風速增加時，其各項參數如波高、波陡、氣溫及水溫與拖曳係數關係並不明顯，然而在其 20 分鐘之平均風速突增時，拖曳係數有劇烈跳增現象，其所穩含意義可能為風向為主導拖曳係數之變化或是在風速不穩定變動之因素下將會產生出非合理之拖曳係數值；因之假設於鋒面過境及風速劇變時將會產生較大變化之拖曳係數值，於恒常風之狀態之，拖曳係數與風速應為獨立之關係。

(三)、仔細研究各家風切之經驗式中可知實際上拖曳係數與風速之相關性非常微弱，以吳京關係式來看，用全球平均之風速值 7m/s 代入 6 式中之 a 及 b 中，可知第一項為第二項值之兩倍；因此可知推知風速對拖曳係數的值影響不大，實際上以風切之關係式 $\tau = \rho C_{10} U_{10}^2$ 來看，風切已為風速平方函數，若拖曳數再與風速有關則風切將成為風速立方函數，其真正關係只有颶風下才可得到驗證；然而颶風下實驗數據幾乎不可得，因之本人認為在 6-16m/s 之風速下風切關係式應與風速平方有關，實際上亦有數位學者提出之經驗公式中認為風速與拖曳係數是無關。

(四)、在本實驗與曾若玄於台中港外海平台上(8 米水深)量測之資料相比較可知拖曳係數與風速

無關，而本實驗於 4 米水深中有較大於曾若玄(於 8 米深)的拖曳係數經驗式，此即驗證水深與拖曳係數有關，然而曾若玄之實驗數據明顯偏小於其他的研究，顯示了實驗中風速儀之高度及儀器使用將會影響實驗之結果。

(五)、拖曳係數研究亦行數十年，然而對風速，資料量取之高度，海水狀態以及風向之研究的確不多，更有系統之探討有其必要性；雖然實驗結果與吳京關係式相近，然而拖曳係數與風速之獨立性研究有其必要性，而在風速轉變之天氣劇變下則建議為主要影響拖曳係數之因素。

參考文獻：

- Blanc, T.V., W.J. plant and W.C. Keller, 1989: The N.R.L. air-sea interaction blimp experiment. *Bulletin of Amer. Meteor. Soc.*, **70**, 354-365.
- Donelan, M.A., 1982: The dependence of the aerodynamic drag coefficient on wave parameters. In: first international confer. on meteor. and air sea interaction of the coastal zone. *Amer. Meteor. Soc.*, Boston, 381-387.
- Geernaert, G.L., 1990: Bulk parameterizations for the wind stress and heat fluxes., *Surface waves and fluxes*, 1, Ed. Geernaert, G.L. and W.L. plant, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Geernaert, G.L., K.B. Katsaros and K. Richter, 1986: Variation of the drag coefficient and its dependence on sea state. *J. Geophys. Res.*, **91**, 7667-7679.
- Hasselmann, K. and co-authors(The WAMDI group), 1988: The WAM model- A third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.*, **18**, 1775-1810.
- Large, W.G. and S. Pond, 1981: Open ocean momentum flux measurements in moderate to

- strong winds. *J. Phys. Oceanogr.*, **11**, 324-336.
- Smith, S.D., 1980: Wind stress and heat flux over the ocean in gale force winds. *J. Phys. Oceanogr.*, **10**, 707-726.
- Tenneks, H., 1973: The logarithmic wind profile. *J. Amer. Science*, **30**, 234-238.
- 吳京, 1968: Laboratory studies of wind wave interaction. *J. Fluid Mech.*, **34**, 91-112.
- 吳京, 1980: Wind stress coefficients over sea surface near neutral conditions: A revisit. *J. Phys. Oceanogr.*, **10**, 727-740.
- 吳京, 1994: The sea surface is aerodynamically rough even under light winds. *Boundary Layer Meteor.*, **69**, 149-158.
- 曾若玄, 1995: Tower based measurements of wind stress and its dependence on sea state. In: US-ROC microwave remote sensing workshop. Delaware, 121-132.

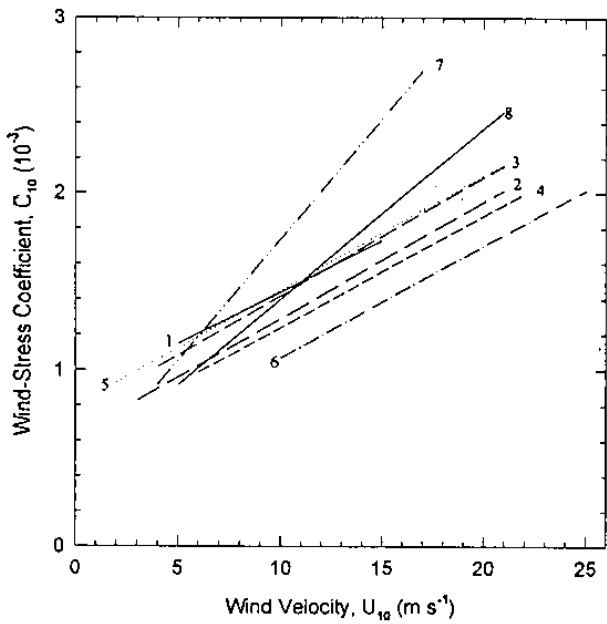
Parameterization of Drag Coefficient for Coastal Environment

Chuan-Wen Ting Hsiao-Hua Chen

Naval Weather Center

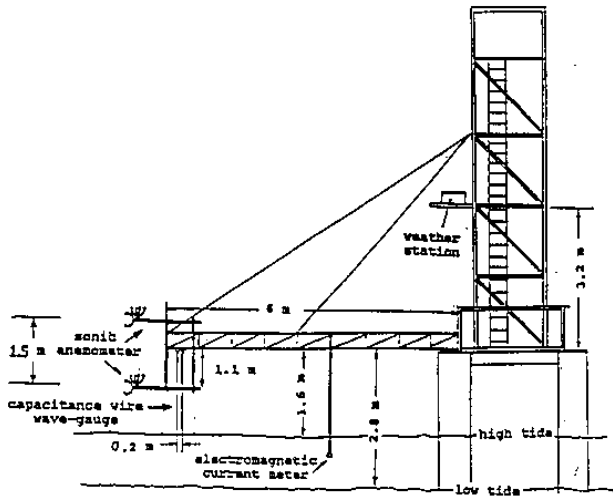
Abstract

The increasing concern of coastal processes calls for a need to accurately estimate the wind stress. Various wind-stress models based on the open ocean data have been proposed. Most of the studies found the correlation between drag coefficient and wind velocity, however, studies in the coastal area are still scarce. The purpose of this paper is studying the drag coefficient over the coastal environment. Field experiment conducted at the Delaware Bay in USA, and previous wind stress models were compared in this studies. Surprisingly, field experiment result shows that coastal drag coefficient is almost independent with wind velocity, and the drag coefficient is not related to the average wind velocity but suddenly increasing wind velocity. Further experiment under gust wind or weather system changed was suggested.

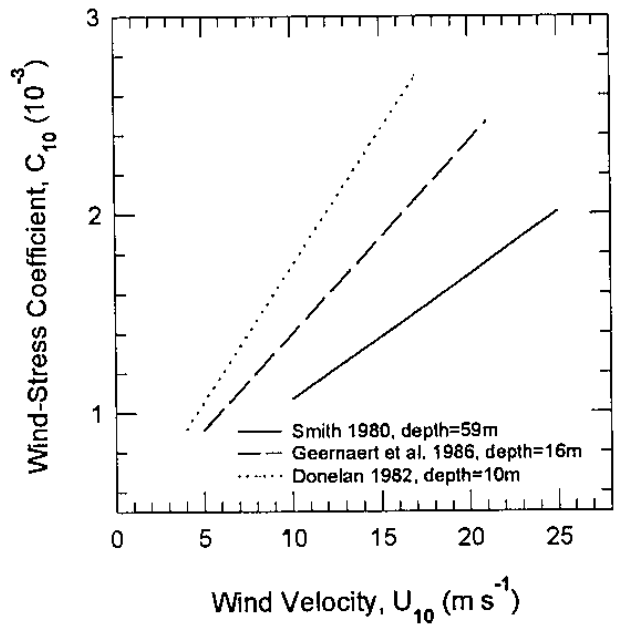


- | | |
|------------------------|---------------------------|
| 1 Wieringa (1974) | 5. Wu (1980) |
| 2 Smith & Banke (1975) | 6. Large and Pond (1981) |
| 3 Garratt (1977) | 7. Donelan (1982) |
| 4 Smith (1980) | 8. Geernaert et al (1986) |

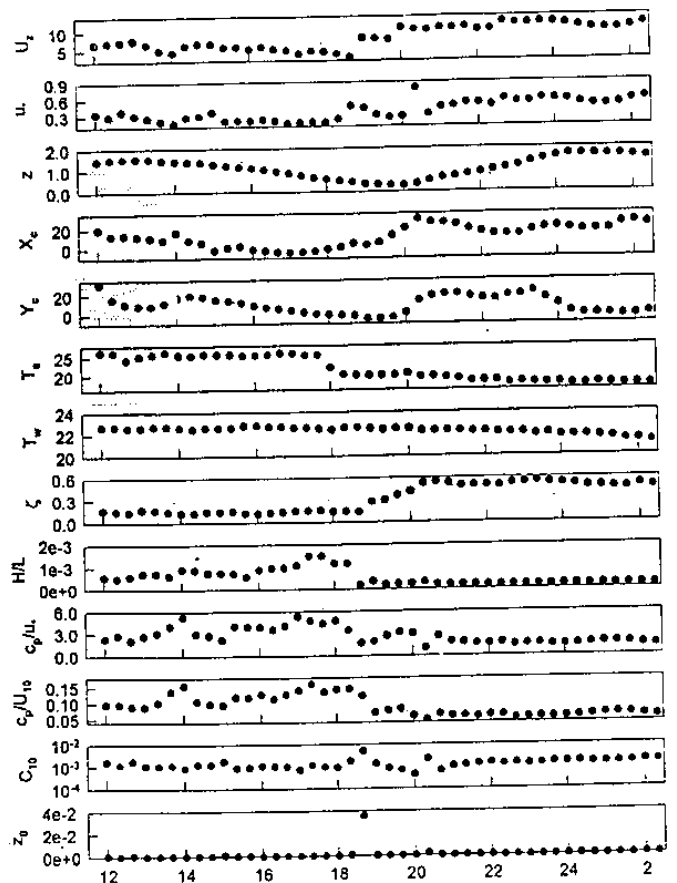
圖一、拖曳係數對風速之關係。



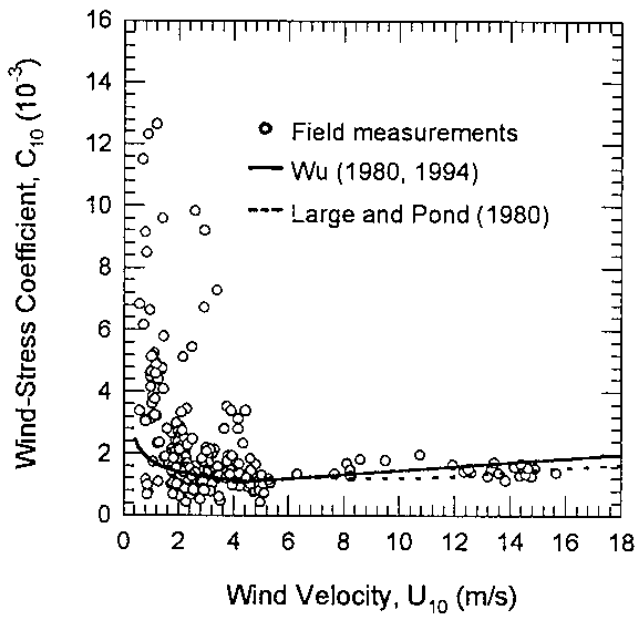
圖三、美德拉瓦海灣方向標示平台上實驗儀器配置圖。



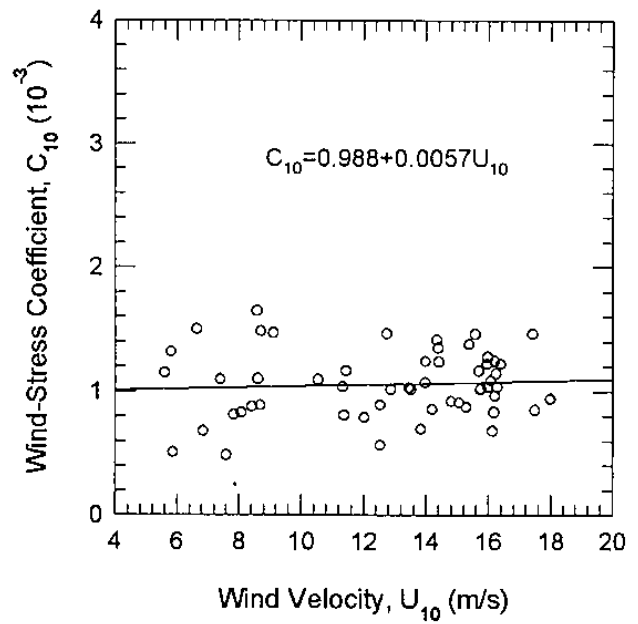
圖二、拖曳係數對在不同水深下對風速之關係。



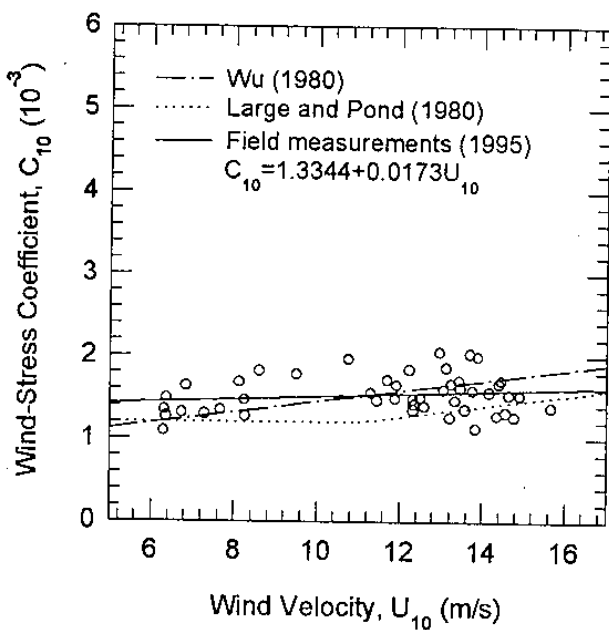
圖四、美德拉瓦海灣中量測之時間序列資料，x 軸為量測時之時間，其以每 2 小時為一間格，每一點代表 20 分鐘之資料平均值，資料時間於 1995 年 9 月 21 日 12 時起連續取 14 小時。



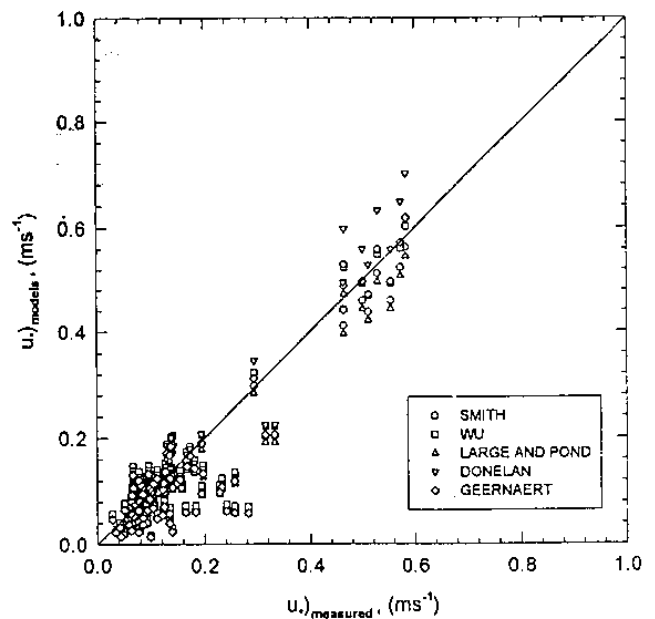
圖五、拖曳係數對風速之關係(本實驗之結果)。



圖六、拖曳係數對風速之關係及迴歸經驗式(曾若玄於台中外海量測之資料)。



圖七、拖曳係數對風速之關係及迴歸經驗式(本實驗之結果)。



圖八、本實驗所得之 u_{10} 值與各家模式 u_{10} 值相比較之結果。