

台南與高屏沿岸表層流況及水平擴散之觀測

曾若玄¹ 許國榮² 廖克恒²

關鍵詞：浮標、延散、擴散係數、長度尺度。

摘 要

本研究係在台南曾文溪口及高屏附近海域進行數次的浮標群飄流擴散實驗，浮標定位方式有 ARGOS/GPS 及航海雷達兩種，以瞭解此海域的表層流況與水平擴散特性。調查結果顯示，曾文溪口近岸海域的浮標軌跡、流速、速度自相關係數等均與潮汐的關係密切，而高屏外海的浮標飄流型態則與潮汐的關連較少，但是呈現明顯的季節性的差異，而且積分時間尺度、渦流長度尺度與擴散係數等均大於曾文溪口近岸海域之值。在某一個長度尺度以上時，浮標群的離散便快速增加，所推算的延散係數與擴散係數均隨著長度尺度的增加而漸大，而且大致符合傳統的 4/3 次方擴散定律，此外本文並探討流場運動性質與水深變化的關係。

OBSERVATIONS OF SURFACE CURRENTS AND HORIZONTAL DIFFUSION IN COASTAL WATERS OF TAINAN, KAOHSIUNG AND PINGTUNG

Ruo-Shan Tseng Kuo-Rong Hsu Keh-Herng Liao

*Department of Marine Resources
National Sun Yat-Sen University
Kaohsiung, Taiwan 80424, R.O.C.*

Key Words: drifter, dispersion, eddy diffusivity, length scale.

ABSTRACT

Experiments of drifter cluster dispersion were conducted in the Tseng-wen estuarine waters near Tainan and coastal waters off Kaohsiung and Pingtung. Two techniques of drifter positioning were used, i.e., ARGOS/GPS and shipborne radar. This study is aimed to better understand surface currents and horizontal diffusion of the studied sites. The results indicate that in Tseng-wen estuaries, drifter trajectories, velocities and autocorrelation functions are closely related to tidal conditions. Drifter trajectories in Kaohsiung and Pingtung offshore waters show strong seasonal variations but less connections with tides. The integral time scale, length scale and eddy diffusivities at Kaohsiung and Pingtung offshore waters are greater than those of Tseng-wen estuaries. At these two sites there exists a certain length scale, and the drifters dispersed more rapidly beyond this length scale. The estimated dispersion coefficients and eddy diffusivities appear to increase with the increasing length scale and follow the traditional four-thirds scale law. Furthermore, relationships between differential kinematic properties of flow fields and local water depths were also discussed.

¹ 國立中山大學海洋資源學系副教授

² 國立中山大學海洋資源學系碩士

一、前言

台灣近年來由於工商業的急速發展，各型工廠林立，都市人口集中，無可避免地會造成自然環境相當程度的破壞和衝擊，為了減輕陸地資源的過度使用與嚴重污染，因此將事業廢棄物與電廠溫排水等經由海洋放流與投棄的方式排放於海洋中並不失為一可行之道，但如何在排放廢棄物的同時又不造成環境生態的壓力，則需要充份瞭解各個特定海域的涵容能力和擴散特性，以作為工程設計的參考。海域涵容能力為評估水體所能承受污染程度的一項重要指標，它和當地海域的流動混合狀況有著密切的關係 [1]。描述與調查海洋流況的方法有兩種，第一種為在某些固定位置上，觀測於不同時間下通過該點的流體速度，這稱為 Eulerian 方法，實際作法便是將海流儀錨碇於海洋中定點一段時間記錄流速。第二種是跟隨著某個流體質點，觀測它在不同時間下的位置，再換算成流速，這稱為 Lagrangian 方法，實際作法便是利用自由飄流的浮標，觀察它在海洋中的軌跡。理論上當觀測點數很多時，這兩種方法的觀測結果應該是相同的，然而從實際的觀點而言，Lagrangian 方法較為可行，而且也能比較適切的說明流場狀況。流況的調查除了有助於上述海洋污染擴散的研究以外，對於其它許多相關課題也很重要，例如海岸變遷、海洋國防安全以及區域性海洋學（如黑潮和東海、南海海水之間的水團交換）等之研究。

一般而言，海洋流場大部份時間是處於紊流狀態，它造成了流場中許多不同大小的渦旋，其所導致的混合擴散效應遠大於分子間之擴散效應，紊流擴散係數表示流體被動性質（如溫度、鹽度等）在水中由亂流所造成的擴散分佈能力，一般又可分為水平與垂直方向的擴散係數，而垂直方向的係數值遠小於水平方向的值，本研究的焦點是水平擴散係數，它是海洋水理水質數值模式的一項重要環境參數，國內在這方面的研究一般多假設其值約為 $5 \sim 8 \text{ m}^2/\text{s}$ [2,3]，但是並無實測結果佐證。調查海洋擴散係數的方法一般有兩種 [4]，即為：(1) 施放螢光染料，採樣分析各點隨時間的濃度分佈。(2) 佈放數個成列的錨碇式海流儀，再以兩兩之間的相對流速來計算。(3) 施放自由飄流的浮標群，並記錄它們的移動軌跡及擴散過程。其中第一種方法在海上作業不易，而第三種的 Lagrangian 方法較之第二種的 Eulerian 方法更為直接且較有意義。

Okubo [5] 綜合許多以前的染料實驗結果，得到的結論為延散係數 (dispersion coefficient) 與長度尺度的 $4/3$ 次方成正比。Yanagi 等 [6] 利用浮標及螢光染料調查日本 Mikawa 灣當地的海流情形，並扣除剪力流的效應以推算擴散係數。Ichiye 等 [7] 觀測浮標群在墨西哥灣內的流場擴散特性以用來預測海拋對周圍海水的效應。Winant [8] 以 22 個成串的錨碇式海流儀觀測南加州外海的沿岸流場，設計不同的海流儀間距，並發現 Eulerian 延散係數隨著海流儀的間距增大而增加。List 等 [9] 同時使用浮標和海流儀方式觀測南加州沿岸表層流場，結果發現在某些潮汐情況下之延散係數可能為負值，而且當地的近岸流動在 $4 \sim 5$ 公里範圍內甚為相關。

國內在浮標測流及擴散特性方面的調查研究較少，這可能是受到觀測與定位技術的限制，例如胡 [10] 利用 ARGOS 衛星系統來追蹤定位浮球隨著黑潮流經台灣附近時之運動軌跡，這是屬於大尺度的研究，在小尺度近岸海域浮標的調查研究方面則有曾等 [11] 和藍等 [12] 以船隻追蹤單一浮標並以 GPS 定位，再根據 Taylor [13] 的古典理論來計算 Lagrangian 的絕對擴散係數，但是此法並不適用於多個浮標的相對擴散及長時間的實驗，廖 [14] 則是利用船上的雷達同時追蹤數個浮標，惟其定位之精確度並不理想。綜合以上的回顧與檢討，本研究便是針對先前研究的缺失與不足之處加以改進，從國外引進了 ARGOS / GPS 浮標，其定位精確度較雷達為佳，實驗設計上是同時以多個浮標觀測海流，藉以瞭解浮標群在近岸海域的相對擴散及延散，並推算延散係數和擴散係數隨著時間與空間尺度的變化情形。

二、理論基礎

首先定義座標軸方向，本文中的 X 為東西方向，向東為正， Y 為南北方向，向北為正。假設有 N 個浮標或質點同時在水中逐漸飄散開來，則可由某一時間 t 的所有浮標位置 (x_i, y_i) 取算術平均而求得浮標群質心的位置，如下式所示：

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (2)$$

浮標群的平均速度即為質心位置 $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 對時間之微分，而浮標群在 X 和 Y 方向上的位置變異數可表示成

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1} \quad (3)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N-1} \quad (4)$$

在某一時間 t ， X 和 Y 方向上以及整體的相對延散係數便可求得，如下式所示

$$K_x = \frac{1}{2} \frac{\partial \sigma_x^2}{\partial t} \quad (5)$$

$$K_y = \frac{1}{2} \frac{\partial \sigma_y^2}{\partial t} \quad (6)$$

$$K = \frac{1}{2} \frac{\partial \sigma^2}{\partial t} \quad (7)$$

$$\text{其中 } \sigma^2 = \frac{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}{2} \quad (8)$$

這是根據 List 等 [9] 的定義而求得，特別值得注意的是由公式(5)和(6)計算所得的延散係數包含了許多效應在內，例如由潮汐所導致的向岸或離岸運動，此外尚有流切 (current shear)、旋轉及紊流擴散等，將這些效應自延散中扣除便可得到紊流擴散。利用泰勒展開法可將浮標群在某一時間 t 的速度表示如下

$$u_i = \bar{u} + (x_i - \bar{x}) \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + (y_i - \bar{y}) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + u_i'' \quad (9)$$

$$v_i = \bar{v} + (x_i - \bar{x}) \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + (y_i - \bar{y}) \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + v_i'' \quad (10)$$

其中 u_i 及 v_i 分別代表第 i 個浮標於時間 t 在 X 及 Y 方向的速度， $\bar{u}$ 及 $\bar{v}$ 代表全體浮標群於時間 t 在 X 及 Y 方向的平均速度， $\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial \bar{v}}{\partial x}$ 及 $\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}$ 為在浮標群質心點的速度梯度， u_i'' 和 v_i'' 分別代表第 i 個浮標於時間 t 在 X 及 Y 方向的紊流速度。速度梯度又可表示為流場的運動特性 (簡稱 DKP)，亦即離散度、渦度、剪力變形率和伸長變形率等四項，分別定義如下

$$\begin{aligned} D &= \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} && \text{(離散度)} \\ \xi &= \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} && \text{(渦度)} \\ S &= \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} && \text{(剪力變形率)} \\ T &= \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} && \text{(伸長變形率)} \end{aligned} \quad (11)$$

Okubo 與 Ebbesmeyer [15] 提出一個最小平方方法以計算 DKP，Halide 及 Sanderson [16] 則整理出一個迴歸式以矩陣的方式來解出 DKP，求出後再代回公式(9)、(10)和(11)便可得到紊流速度。

紊流擴散係數可藉由相似於混合長度理論及紊流的理論來說明，亦即擴散係數正比於混合長度及紊流強度的乘積，Okubo 與 Ebbesmeyer [15] 假設在海洋中紊流強度相當於紊流速度的標準差 (σ_u 或 σ_v)，而混合長度相當於浮標群位置的標準差 (σ_x 或 σ_y)，因此於時間 t 在 X 和 Y 方向的擴散係數 k_x 和 k_y 可表示為

$$\begin{aligned} k_x &= c \sigma_x \sigma_u \\ k_y &= c \sigma_y \sigma_v \\ k &= (k_x + k_y) / 2 \end{aligned} \quad (12)$$

其中 c 為一常數，其值介於 0.1 到 1.0 之間 [15]，而 Ozmidov [17] 認為 c 值取 0.1 比較合理。

三、浮標實驗

3.1 儀器設備

本研究所採用的浮標為 CODE 型式 [18] 的表層浮標 (Surface drifter, 美國 ClearWater 公司) 如圖 1 所示，其中內含電池、GPS 定位系統、ARGOS PTT (Platform Terminal Transmitter) 發射器 (頻率為 401.65MHz)、四組由帆布與塑膠支柱所組成的槽流板以及四個直徑為 12cm 的浮球，整套系統重約 10kg。當浮標施放下水後僅有部份天線及浮球露出水面，由於浸於水中的槽流板面積甚大於浮球及天線外露的部份，故對所承受的海流而言，可產生最小的滑力，因此浮標的運動可視為近似 Lagrangian 的流動，且可完全依循表層 (海面下 1m 以內) 海流流況。浮標本體也以一條長約數公尺的繩索連接一組電浮標 (Radio Beacon, 型號 RF-700C1, 加拿大 NovaTech 公司)，能以兩秒一周期定時發出 VHF 無線電信號 (頻率為 54.585 ~ 160.785MHz) 及夜間閃光以方便浮標的回收作業。簡單來說，這種浮標的定位是使用 GPS 方式，資料的傳送則是經由 ARGOS 衛星系統傳送至位於法國的處理中心，再透過國際網路系統以 E-mail 或 FTP 方式將資料傳回我們實驗室，收到的資料先轉換成 ASCII 格式檔案，再經由自行撰寫的程式排序整理成日期、時間、PTT 編號、經緯度等格式。我們一共有 5 個浮標，PTT 編號分別為 25380 ~ 25384，但是每次實驗依實際狀況所使用的浮標數目則不等，浮標之施放與回收均以海研三號研究船進行，作業細節請參閱許 [19]。

在浮標定位的誤差方面，先於陸地進行量測估算，第一種方式是將浮標固定於某一點，連續接收數個小時的資

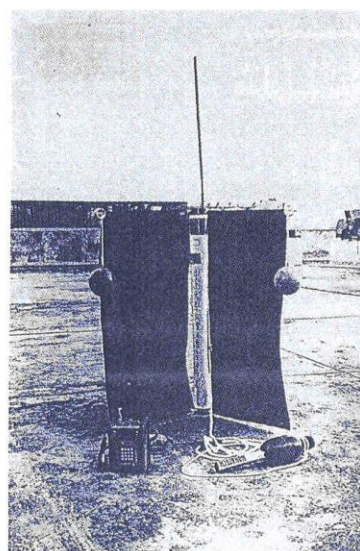


圖 1 本研究所用的表層浮標外觀圖

料，由所得到位置的變動量來估算定位誤差。第二種方式是將浮標固定於已知經緯度的某一標準點上，由所得到位置與正確座標的差異來估算定位誤差，測試結果發現最大偏差距離約為 80m，如以浮標定位的時間間隔為 30min 來估算，所對應的速度誤差則為 $80\text{m} / 1800\text{s} = 0.044\text{m/s}$ ，DKP 誤差則為 $5.5 \times 10^{-4} \text{ 1/s}$ 。

3.2 資料處理

浮標飄流過程的基本資料之傳送及初步處理如前所述。一般來說，處理後的資料仍然有錯誤訊息存在，此時便須用人為的方式將其修正，偵錯的方式是利用浮標行徑的軌跡圖和速度對時間關係圖來作判斷，將不合理的數據予以刪除。各個浮標的定位時間並不一致，因此利用數學方法將其偏移的時間量做修正，以便得到所有浮標的同步位置資料，修正的方式是以一立方雲形插值法 (cubic spline)，利用數點資料的區間導出一個三階多項式，且此立方關係均包含所有原始資料，再由內插的方式定出每隔 30 分鐘的同步浮標位置。本研究所有的實驗時間均設計在 24 小時左右，是一個小尺度的範圍，因此對軌跡資料的需要而言，利用該方法可以得到足夠的資料而且不會失真。資料分析均是採用已經平滑過的內插浮標軌跡時間序列，速度則是由兩點之間的位移對時間的微分來求得。

3.3 實驗過程

本研究一共完成了四次浮標群的實驗，其中兩次在曾文溪口附近海域，兩次在高屏外海，每次實驗同時施放 4 或 5 個浮標，觀測時間約為 18~25 小時，定位時間間隔約為 15~30 分鐘，各個實驗的條件和明細表則列於表 1。

表 1 中的第一次、第二次和第三次實驗均是利用 ARGOS / GPS 方式來定位，浮標下放時的初始分佈形狀約為一個四邊形或五邊形，相鄰兩點的距離約為 100m，浮標下放後研究船便駛離到其它測站做 CTD 水文探測，浮標的時間和位置資料則藉由 E-mail 方式即時傳送回我們的實驗室 (約有 3 小時時差)，再於實驗預定結束之時以傳真或海岸電台的聯絡方式通知研究船上人員說明浮標之最新位置，隨即將船駛至該位置，以搜尋器回收浮標。

第四次實驗的儀器與方法與另外三次實驗稍有不同，浮標為自製，其外型與施放過程與另外三次實驗相似，定位方法則是以海研三號的雷達追蹤掃描浮標上方之雷達反射器，透過雷達螢幕的判讀以得知浮標相對於船的方向與距離，再由船上的 GPS 定出船位，如此便可得到浮標的絕

表 1 四次浮標實驗明細表

實驗代號	浮標日期	施放時間	浮標數目	實驗時數 (hr)	定位間隔 (min)	地點	定位方法
1	1996 年 1 月 4 日	13:00	4	24	30	曾文溪口	ARGOS/GPS
2	1996 年 2 月 15 日	12:40	4	25	30	高屏外海	ARGOS/GPS
3	1996 年 4 月 23 日	12:50	5	18	30	曾文溪口	ARGOS/GPS
4	1995 年 3 月 22 日	15:15	4	18	15	高屏外海	雷達

對位置 [14]。由於本次實驗的定位方法及精確度與前三次實驗不同，因此本次實驗之結果僅供參考比較使用，文章的主要成果仍是以前三次實驗為主。

四、結果與討論

4.1 浮標的飄流軌跡與流速

圖 2(a) 為第一次實驗四個浮標的軌跡圖，大致而言，這四個浮標在實驗期間的軌跡均很相似，在實驗後期則有 PTT 編號 25383 浮標因大幅向北流動進入淺水區域，最後並擱淺於曾文溪口北岸。為了能更清楚的看出所有浮標的走向及速度，因此將其中一個代表性浮標的軌跡及其速度 (u 和 v) 分別繪於圖 2(a) 中之小插圖及圖 2(b)，由潮汐表所預測之安平港高低潮位時間亦標明於圖 2(b) 中作為參考。一般來說，浮標運動有向岸的趨勢，而且和潮位的關係相當密切，在停潮 (滿水位或低水位) 時的浮標速度通常較小，在漲潮期間浮標向北，在退潮期間浮標向南，而且 u 和 v 的相位亦一致。前述擱淺之浮標雖無法及時回收 (事後仍由陸路回收)，但是其位置資料卻仍有持續接收，因此這段較長的記錄可以提供吾人作更深入的探討。圖 3 便是 PTT 編號 25383 浮標的速度變化圖，前述之潮汐效應與特性在此圖中也獲得証實，最大之合成流速約為 1.0m/s ，流速之變化趨勢及週期與潮位一致，但存有若干相位差，主要的原因可能有兩點，一為浮標飄流的海域與安平之間仍有一段距離，二為所使用之水位高係取自潮汐表，與實測值之間仍有若干誤差。

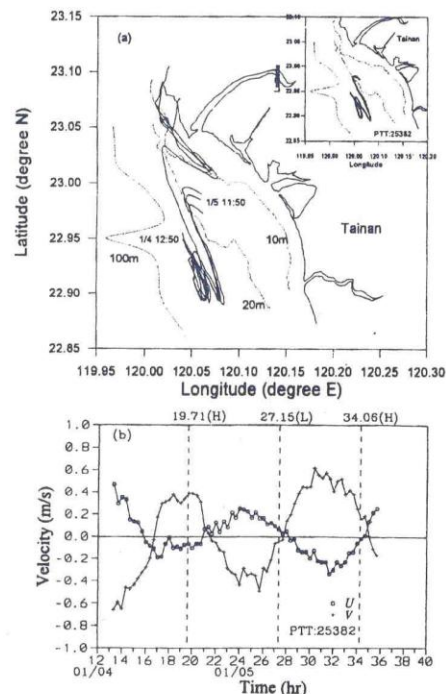


圖 2 曾文溪口 (1996 年 1 月 4 日 ~ 5 日)
(a) 四顆浮標軌跡圖，(b) 浮標速度變化圖，
圖(a)中的附圖是 PTT:25382 浮標的軌跡

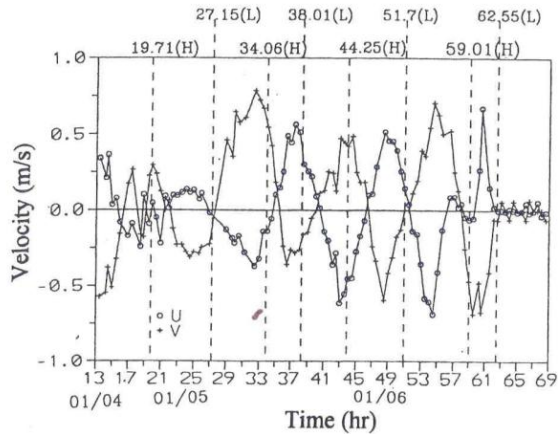


圖 3 浮標 PTT: 25383 在曾文溪口
(1996 年 1 月 4 日 ~ 6 日) 速度變化圖

圖 4(a) 是第三次實驗五個浮標在曾文溪口附近海域之軌跡圖，在實驗前期浮標群的軌跡十分一致，一直到後期浮標才逐漸擴散開來，圖 4(a) 中的小插圖及圖 4(b) 分別為其中一個代表性浮標的軌跡圖及速度變化圖，浮標向岸飄移的趨勢相當明顯，與第一次實驗的結果有許多相似之處，亦即隨著潮位變化浮標沿著海岸線作南北方向的移動，流速隨著時間的變化週期與潮位的週期相同，南北方向的流速稍大於或等於東西方向的流速，最大合成流速約為 0.85m/s 。上述兩個實驗均位於曾文溪口水深 10m 到 100m 之間的水域，可知當地海域的流況是以潮流為主要成份。第二次和第四次實驗均是在高屏外海進行，浮標下放地點在 ($22^{\circ}40'N$, $120^{\circ}E$) 附近，也就是在高雄西方約 15 浬，水深在 200m 以上。圖 5(a) 中的小插圖是第二次實驗 4 個浮標的軌跡圖，圖中顯示到實驗後期浮標才開始加速散開，這段期間的浮標群相對位置放大圖則顯示在圖 5(a) 中，可以看出浮標群主要是向東西方向擴展，圖 5(b) 是其中一個代表性浮標的速度變化圖。這次實驗的結果非常特別，也就是浮標移動很快，從高雄外海先向岸移動，再沿著海岸線向南經過小琉球東邊，最後在枋寮附近回收，最高合成流速曾達 1.7m/s ，流速和流向與潮位（高雄港）的相關性不高。圖 6(a) 和圖 6(b) 分別是第四次實驗的 4 個浮標軌跡圖與速度變化圖，如前所述本次實驗的結果僅供定性上的參考與比較而已，主要的結果也是在實驗後期當浮標間距增大到某個尺度以上時，其擴散才轉為急增，此外最大流速值僅達 0.5m/s 左右，且大部份為向岸的移動。這兩次高雄外海實驗的結果有相當大的差異，可見此海域的海流狀況複雜，而且除了潮流外其它的洋流也很重要。

圖 7(a) 和圖 7(b) 分別是第一次實驗和第二次實驗的浮標速度自相關係數隨著時間變化圖，可以得知曾文溪口近海的流況與潮汐的關係密切，高屏外海則相反。將速度自相關係數對時間積分則可得到時間尺度，很明顯的是高屏外海的時間尺度也比曾文溪口者為大，這也暗示著此兩海域的長度尺度與擴散特性有所不同。

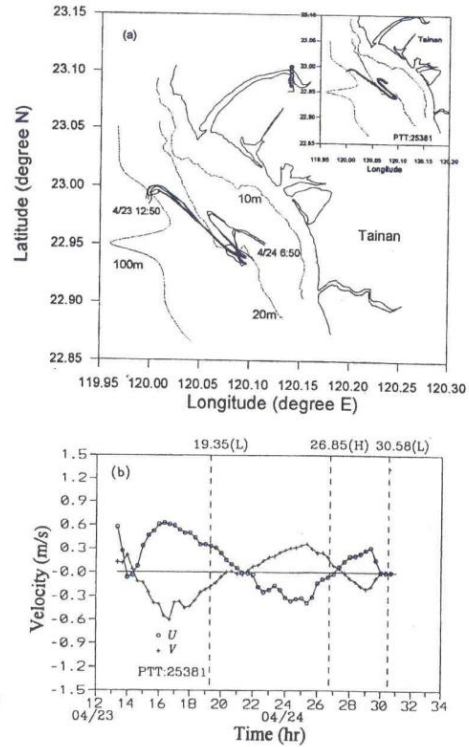


圖 4 曾文溪口 (1996 年 4 月 23 日 ~ 24 日)
(a) 五顆浮標軌跡圖，(b) 浮標速度變化圖
圖(a) 中的附圖是 PTT: 25381 浮標的軌跡

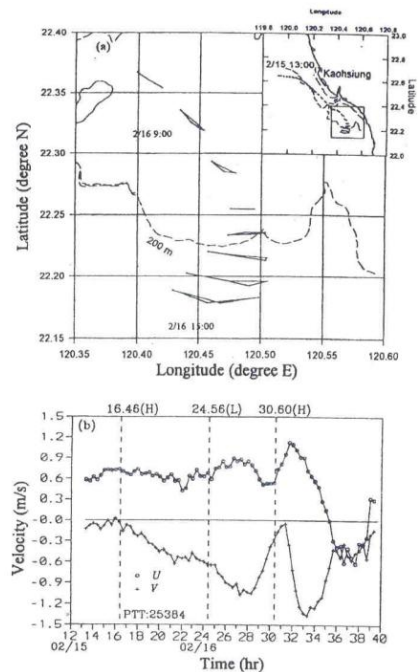


圖 5 高雄外海 (1996 年 2 月 15 日 ~ 16 日)
(a) 四顆浮標軌跡圖 (b) 浮標速度變化圖

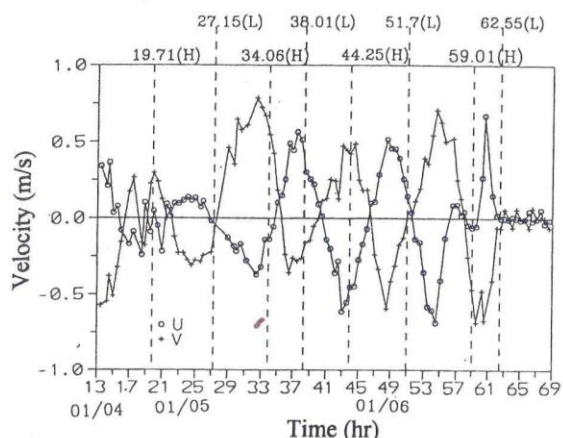


圖 3 浮標 PTT: 25383 在曾文溪口
(1996 年 1 月 4 日 ~ 6 日) 速度變化圖

圖 4(a) 是第三次實驗五個浮標在曾文溪口附近海域之軌跡圖，在實驗前期浮標群的軌跡十分一致，一直到後期浮標才逐漸擴散開來，圖 4(a) 中的小插圖及圖 4(b) 分別為其中一個代表性浮標的軌跡圖及速度變化圖，浮標向岸飄移的趨勢相當明顯，與第一次實驗的結果有許多相似之處，亦即隨著潮位變化浮標沿著海岸線作南北方向的移動，流速隨著時間的變化週期與潮位的週期相同，南北方向的流速稍大於或等於東西方向的流速，最大合成流速約為 0.85m/s 。上述兩個實驗均位於曾文溪口水深 10m 到 100m 之間的水域，可知當地海域的流況是以潮流為主要成份。第二次和第四次實驗均是在高屏外海進行，浮標下放地點在 ($22^{\circ}40'N$, $120^{\circ}E$) 附近，也就是在高雄西方約 15 哩，水深在 200m 以上。圖 5(a) 中的小插圖是第二次實驗 4 個浮標的軌跡圖，圖中顯示到實驗後期浮標才開始加速散開，這段期間的浮標群相對位置放大圖則顯示在圖 5(a) 中，可以看出浮標群主要是向東方向擴展，圖 5(b) 是其中一個代表性浮標的速度變化圖。這次實驗的結果非常特別，也就是浮標移動很快速，從高雄外海先向岸移動，再沿著海岸線向南經過小琉球東邊，最後在枋寮附近回收，最高合成流速曾達 1.7m/s ，流速和流向與潮位 (高雄港) 的相關性不高。圖 6(a) 和圖 6(b) 分別是第四次實驗的 4 個浮標軌跡圖與速度變化圖，如前所述本次實驗的結果僅供定性上的參考與比較而已，主要的結果也是在實驗後期當浮標間距增大到某個尺度以上時，其擴散才轉為急增，此外最大流速值僅達 0.5m/s 左右，且大部份為向岸的移動。這兩次高雄外海實驗的結果有相當大的差異，可見此海域的海流狀況複雜，而且除了潮流外其它的洋流也很重要。

圖 7(a) 和圖 7(b) 分別是第一次實驗和第二次實驗的浮標速度自相關係數隨著時間變化圖，可以得知曾文溪口近海的流況與潮汐的關係密切，高屏外海則相反。將速度自相關係數對時間積分則可得到時間尺度，很明顯的是高屏外海的時間尺度也比曾文溪口者為大，這也暗示著此兩海域的長度尺度與擴散特性有所不同。

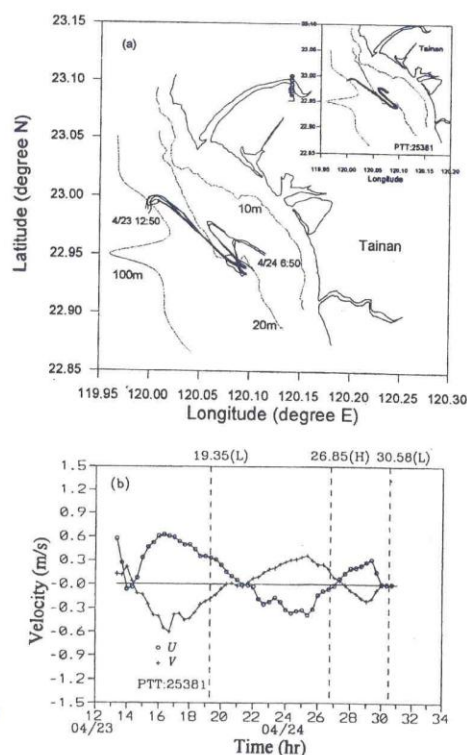


圖 4 曾文溪口 (1996 年 4 月 23 日 ~ 24 日)
(a) 五顆浮標軌跡圖，(b) 浮標速度變化圖
圖(a) 中的附圖是 PTT: 25381 浮標的軌跡

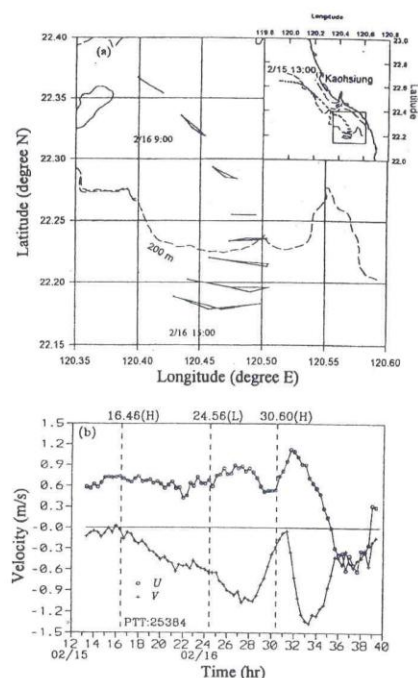


圖 5 高雄外海 (1996 年 2 月 15 日 ~ 16 日)
(a) 四顆浮標軌跡圖 (b) 浮標速度變化圖

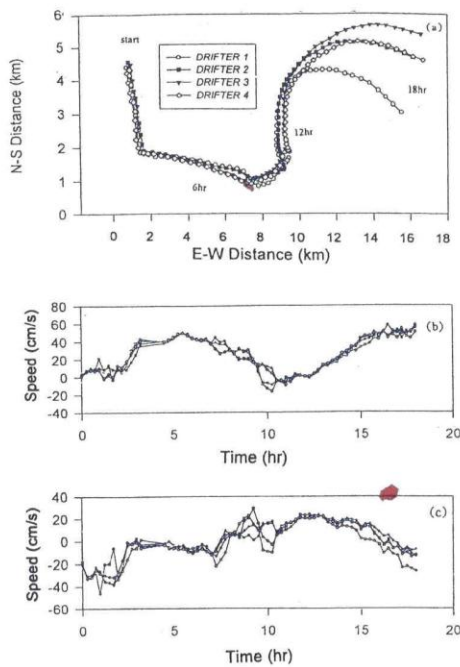


圖6 高雄外海 (1995年3月22日~23日)
(a) 四顆浮標軌跡圖 (b) 浮標X方向速度
(c) 浮標Y方向速度

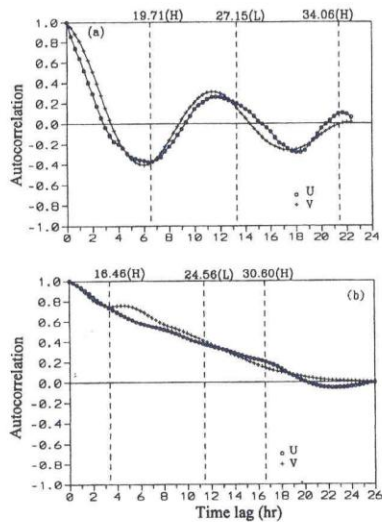


圖7 浮標群速度自相關係數變化圖
(a) 曾文溪口, 1996年1月4日~5日
(b) 高雄外海, 1996年2月15日~16日

4.2 延散與擴散

由浮標的位置時間序列資料, 便可利用公式(3)和(4)推算其位置變異數, 圖8為第一次實驗的浮標群位置變異數對時間變化圖, 其中(c)圖的 σ_{rc}^2 定義為 $2\sigma_x\sigma_y$ [5], 在

稍後將會用來計算長度尺度。由此圖可看出本次實驗在浮標施放之後10~14小時內其位置變異數很小, 接下來之後其位置變異數則轉變為急速增加。根據公式(5)和(6)將此位置變異數對時間微分, 便可得到延散係數, 圖9(a)為第一次實驗的 K_x 和 K_y 對時間變化圖, 由此圖可知在某些時間的延散係數值為負數, 這可能是由於浮標群隨著潮汐漲落有向岸或離岸的運動時, 因為水深的變化所造成的輻散和輻合現象, 這個結果也曾經在List等 [9] 中所記載。由公式(12)所計算出來的擴散係數 k_x 和 k_y 隨時間變化圖則繪於圖9(b)中, 所得到的 k_x 和 k_y 值甚為接近, 另一方面, 由圖9(a)可知在長時間(28hr)之後 k_y 值隨著時間急速增加, 而 k_x 值則大致不變, 此點說明了浮標的運動主要是平行於海岸線而呈南北走向, 東西走向的運動較不顯著, 當扣除平均流與流切等效應以後, 紊流擴散則呈現等向性的結果。隨著長度尺度的增加 k_x 和 k_y 值則有快速增加的趨勢, 最大值約為 $10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$, 黃等 [3] 根據水質數值模式的預測值與現場實測值之比較, 得到台灣沿海的紊流擴散係數平均值為 $5 \text{ m}^2/\text{s}$, 這和本文所得到的結果有相近的數量級。

第三次實驗和第二次實驗的延散係數與擴散係數對時間變化圖分別繪於圖10和圖11中, 延散係數有負值發生的現象仍然可以在這兩圖中看到, 擴散係數在這三次實驗中似乎都呈現出周期性振盪的現象, 其周期大約為6小時, 所求得之高屏外海擴散與延散係數比起曾文溪口的數值要大, 這也說明了擴散特性是有地域性的變化存在。

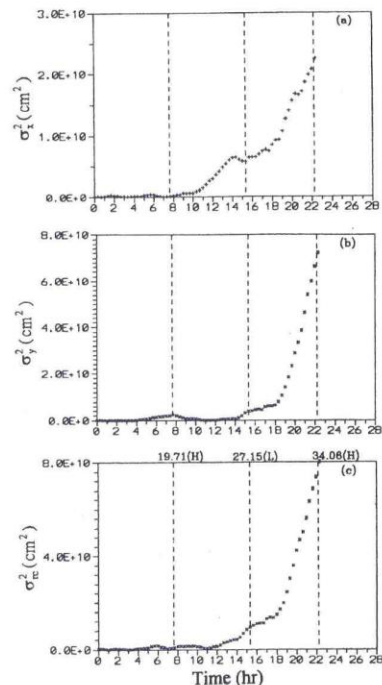


圖8 浮標群位置變異數對時間的變化圖
(a) σ_x^2 , (b) σ_y^2 , (c) σ_{rc}^2
(曾文溪口, 1996年1月4日~5日)

4.3 流場運動性質 (DKP)

DKP 的計算是以 Halide 及 Sanderson [16] 的方法求得，第一次實驗所得到的四個 DKP 性質，即離散度、渦度、剪力變形率和伸長變形率對時間變化均繪於圖 12 中，所對應之浮標位置水深亦繪於圖 12 最下方以作為參考，由此圖可知在實驗初期（浮標釋放後 12 小時內）的離散度大都為負值，亦即浮標群為輻合狀態，此時所對應的位置變異數並不隨時間而增大（圖 8），只有在實驗後期離散度為正值時所對應的位置變異數才劇增。渦度的數值在整個實驗期間經常出現負值，可知浮標群是有順時針方向旋轉的情況。

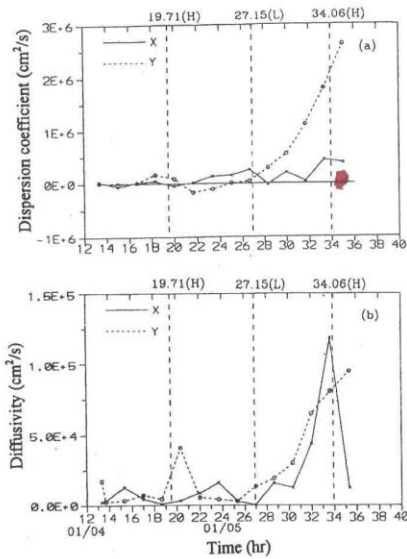


圖 9 (a) 延散係數對時間圖 (b) 擴散係數對時間圖
(曾文溪口，1996 年 1 月 4 日 ~ 5 日)

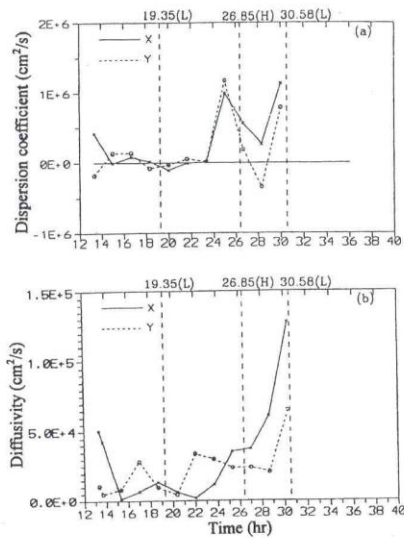


圖 10 (a) 延散係數對時間圖 (b) 擴散係數對時間圖
(曾文溪口，1996 年 4 月 23 日 ~ 24 日)

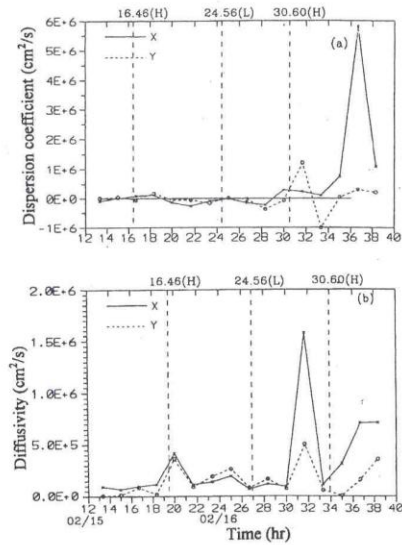


圖 11 (a) 延散係數對時間圖 (b) 擴散係數對時間圖
(高雄外海，1996 年 2 月 15 日 ~ 16 日)

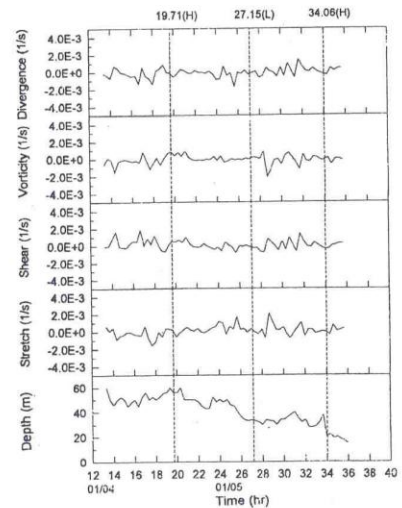


圖 12 流場動力性質 (DKP) 變化圖
(曾文溪口，1996 年 1 月 4 日 ~ 5 日)

圖 13 是第二次實驗於高屏外海所得到的 DKP 隨時間變化圖，此圖與圖 12 (曾文溪口) 最大的不同便是 DKP 數值呈現劇烈的不規則跳動變化，這個現象與當地的水深變化可能有密切的關係，在曾文溪口近海的實驗其浮標群所處的水深大都在 20m 到 80m 之間，水深變化不大，而高屏外海的實驗其浮標群則通過了大陸棚與高屏峽谷，水深從 50m 到 600m 不等，根據連續方程式 $\partial u / \partial x + \partial v / \partial y = -dh / h dt$ ，其中 h 為水深，這說明了水深變化率對於流場運動性質造成了很大的影響，最明顯的例子是在 2 月 16 日凌晨 3 時左右浮標群通過高屏峽谷，劇烈的水深變化也造成了劇烈的 DKP 值變化 (圖 13)。

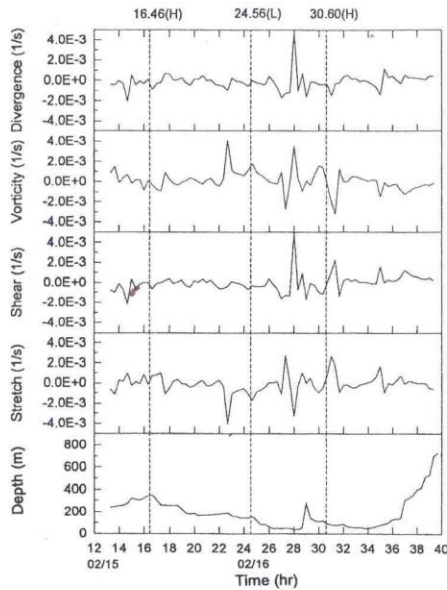


圖 13 流場動力性質 (DKP) 變化圖
(高雄外海, 1996 年 2 月 15 日 ~ 16 日)

4.4 長度尺度與擴散定律

Okubo [5] 綜合過去許多次染料實驗的結果, 認為延散係數與長度尺度之間存在著 $4/3$ 次方的正比關係, 其中長度尺度的定義為 $l_{Okubo} = 3\sigma_{rc}$, $\sigma_{rc}^2 = 2\sigma_x\sigma_y$, 而延散係數定義為 $K_a = \sigma_{rc}^2/4t$, 其中 t 為時間。另一方面, List *et al.* [9] 的定義則稍有不同, $l_{List} = 2\sigma$, $\sigma^2 = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)/2$, $K = d\sigma^2/2dt$ 。Okubo [20] 對這兩種定義進一步說明, 證明 $K \approx 3K_a$, $l_{Okubo} \approx 2.12 l_{List}$ 。圖 14 為第一次、第二次和第三次

次實驗的延散係數對長度尺度變化圖, 分別採用 Okubo [5] 和 List 等 [9] 的兩種定義計算而得, 圖 15 與圖 14 類似, 僅座標改成擴散係數, 由這兩圖可看出實驗結果大部份均落在 Okubo [5] 的資料上下限區間, 且大致符合 $4/3$ 次方的擴散定律, 其中尤以 Okubo [5] 的定義所求得之長度尺度與擴散係數的結果最為理想。

如前所述, 實驗結果顯示當浮標群間距達到某一長度以上時, 位置變異數及延散係數等均會急速增大, 這可以推論當地海域存在某種大小的渦旋, 當數個浮標被這種渦旋「捕獲」時, 所有浮標的運動大致是相關且同步的, 因此輻散現象就不明顯, 只有當浮標群間距大於此一渦旋長度時, 浮標間的運動才變得較不相關且加速輻散, List *et al.* [9] 在南加州外海也曾經觀察到類似的結果, 唯其長度尺度較大。實驗結果指出曾文溪口近海與高屏外海的渦旋長度尺度大約均介於 1km 到 3km 之間, 而以高屏外海的數值較大。由圖 14 與圖 15 可得知當長度尺度介於 1~3km 時, 曾文溪口的 $K = 1.4 \times 10^5 \sim 1.27 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$, $k = 1.5 \times 10^4 \sim 1.36 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$, 而高屏外海的 $K = 8.03 \times 10^5 \sim 1.83 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$, $k = 4.37 \times 10^4 \sim 1.99 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。Koh 與 Brooks [1] 提出了一個由長度尺度推算擴散係數的公式, $k = AL^{4/3}$, 其中 A 值為 $1.5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ ft}^{2/3}/\text{sec}$, 公式是用英制單位計算。根據此一公式換算為公制單位, 得到當 $L = 1\text{km}$ 時, $k = 0.68 \sim 22.56 \text{ m}^2/\text{s}$, 當 $L = 3\text{km}$ 時, $k = 2.97 \sim 98.87 \text{ m}^2/\text{s}$, 本研究求得之擴散係數比較趨近上述預測值的下限。

綜合上述討論, 可知擴散係數是隨著污染物水團的水平尺度大小而有 $4/3$ 次方正比增加的結果, 在不同海域該係數值則有所不同, 一般在海洋水理及傳輸擴散模式中所選取的擴散係數均為固定值, 此點似乎並不完全正確, 而是應該隨著時間和水平尺度的增加而增加, 本研究的調查結果或許可提供這方面實際應用的參考。

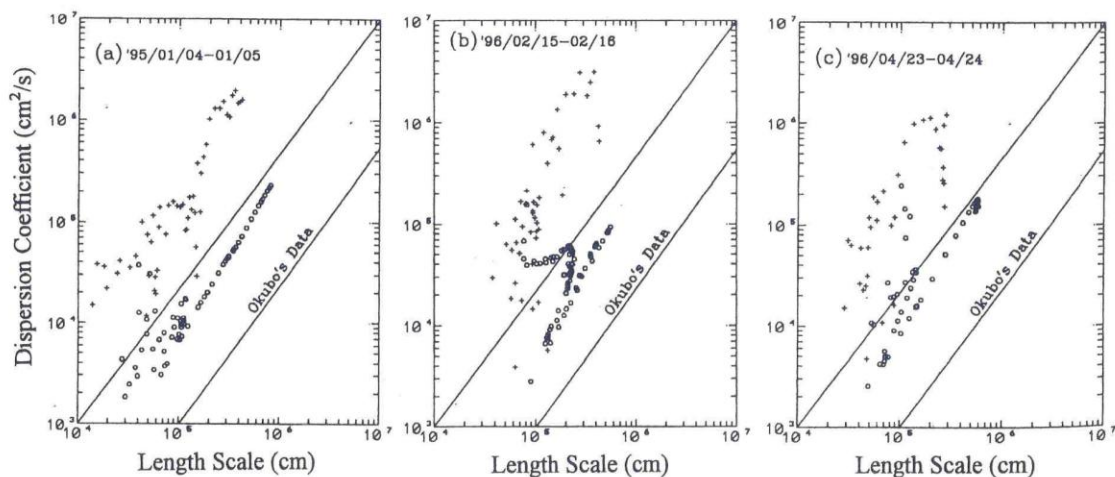


圖 14 延散係數隨長度尺度變化圖, 其中 (a) (b) (c) 圖分別為第一次、第二次和第三次實驗的計算結果, “+” 為根據 List 等 [9] 的定義計算所得, “.” 為根據 Okubo [5] 的定義計算所得, 兩條 $4/3$ 次方的直線代表 Okubo [5] 的資料上下限

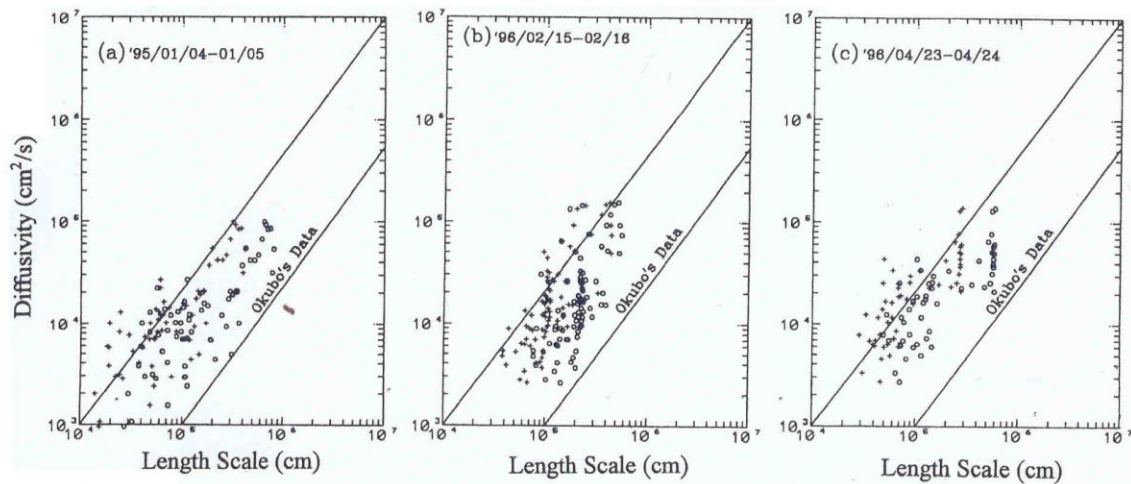


圖 15 擴散係數隨長度尺度變化圖，其中的符號與圖 14 相同

五、結 論

本研究利用 ARGOS / GPS 浮標在台南及高屏沿海進行飄流擴散實驗，以瞭解此海域的表層流況及水平擴散特性。在曾文溪口海域的兩次實驗，浮標的運動軌跡、速度、自相關係數等與潮汐的漲退有很密切的關係，浮標的速度隨時間變化呈現出與潮位相似的週期性，其中又以南北方向的速度比起東北方向更為明顯與強勁。浮標的飄流方向在漲潮期間大致上是朝北，在退潮期間則是朝南，但是與潮位之間仍存在著若干相位差。在高屏外海的兩次實驗，浮標的運動軌跡、速度、自相關係數等均顯示出與潮位的關連較少，其原因可能是實驗地點較為離岸以及當地洋流的影響，其 1996 年 2 月所觀測到的浮標流速非常強勁，最快速曾達到 1.7m/s，流向朝南。

由多浮標擴散實驗結果，可以針對該海域的擴散特性及流場運動性質作更深入的探討。浮標群的位置變異數隨時間的變化趨勢說明了在某一個時間及長度尺度以上時浮標的離散便快速增大。對曾文溪口海域及高屏外海而言，此擴散長度尺度大約為 1 ~ 3km 左右，高屏外海的積分時間尺度及長度尺度均大於曾文溪口的數值。延散係數可直接由浮標群的離散程度對時間微分而求得，當浮標群隨著潮汐漲退而有向岸或離岸運動時，其延散係數會呈現出正負值交替的現象，若扣除流場的剪力效應，則可求得紊流擴散係數。延散係數與擴散係數均隨著長度尺度的增加而漸大，並且大致和 Okubo [5] 的資料上下限，亦即 4/3 次方定律相符合。當長度尺度為 1 ~ 3km 時，所得到的延散係數大約為 $1.4 \times 10^5 \sim 1.27 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ (曾文溪口)， $8.03 \times 10^5 \sim 1.83 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ (高屏外海)，而擴散係數則約為 $1.5 \times 10^4 \sim 1.36 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ (曾文溪)， $4.37 \times 10^4 \sim 1.99 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ (高屏外海)。浮標的離散現象並非對稱性，在曾文溪口一月份是以南北方向為主，四月份則較為對稱，在高屏外海二月份則是以東西方向為主。流場運動性質 (DKP) 的計算結果與浮標群的實際離散運動現象大致吻合，高屏

外海的 DKP 值最大，變化也最為顯著，曾文溪口的 DKP 值最小，變化也不大，這和浮標所處海域的水深變化率之間的關係密切。

從本研究的實驗結果可証實 ARGOS / GPS 浮標對於沿岸海域較小尺度的流況觀測與水平擴散特性調查相當合適，其價格、資料傳送接收、操作與回收性能等均合理可行，未來若能更進一步提高定位精確度 (DGPS)，將更為理想。

誌 謝

本研究承國科會研究計畫 (NSC85-2621-P-110-005) 支助經費，謹此誌謝。

參考文獻

1. Koh, R.C.Y., and Brooks, N.H., "Fluid mechanics of waste-water disposal in the ocean", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 7, pp. 109-133 (1975).
2. 楊文衡、曾啓明，「電廠溫排水在海域混合擴散數值計算」，第 16 屆海洋工程研討會論文集，高雄，第 b134-b148 頁 (1994)。
3. 黃煌輝、楊春生、唐公群、李得藩，「大氣影響下之溫排水擴散二維數值模式分析」，第 8 屆海洋工程研討會論文集，臺南，第 19-41 頁 (1985)。
4. Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H., "Mixing in inland and coastal waters," *Academic Press*, New York, p. 483 (1979).
5. Okubo, A., "Oceanic diffusion diagrams," *Deep Sea Research*, Vol. 18, pp. 789-802 (1971).
6. Yanagi, T., Murashita, K., and Higuchi, H., "Horizontal turbulent diffusivity in the sea," *Deep Sea Research*, Vol. 29, pp. 217-226 (1982).
7. Ichiye, T., Inoue, M., and Carnes, M., "Horizontal diffusion in ocean dumping experiments," In: *Ocean Dumping of Industrial Wastes*, (Edited by Ketchum, B.H., Kester, D.R. and Park, P.K.), Plenum Press, New York, pp. 131-159 (1986).