

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

波浪場中射流入射角度對稀釋特性之影響

Effect of discharge angles on the dilution of buoyant jet in wave motions

計畫編號：NSC 90-2211-E-041-013

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：錢紀銘 嘉南藥理科技大學環境工程衛生系

一、中文摘要

本計畫以雷射誘發螢光原理結合影像處理系統應用於研究圓管浮昇射流以不同排放角度入射波浪場時，其表面稀釋特性之變化。根據實驗觀測與分析結果得知在波浪運動下之浮昇射流，不僅邊界寬度的擴展較純射流時大，稀釋率也將大幅提升，經由定量量測結果發現，順逆向射流皆優於純射流時，兩者其無因次表面稀釋率 S/S_0 值皆隨波浪參數 L_q/Z_m 呈線性遞增，且在相同角度下，逆向射流之表面稀釋率略優於順向射流，相關結果業歸納求得經驗式供工程設計上之參考。

關鍵詞：圓管純射流、波浪運動、稀釋率、相對邊界、入射角度

Abstract

An experimental system combined with the theory of laser-induced fluorescence and digital image process was used to investigate the initial dilution of buoyant jet discharged into wave field under different angles. According to the experimental results, the wave motion will increase the initial dilution in proportional to the wave parameter (L_q/Z_m) under different discharge angles. The dilution rate in opposing discharge is larger than that in co-wave discharge. Empirical formulas were proposed for the estimation in engineering design.

Keywords: pure round jets, wave motion, dilution rate, relative boundary, incidence

angle

二、緣由與目的

一般海洋放流建造前需作稀釋倍率估算，以瞭解廢污水與海水混攪後其濃度稀釋降低之程度，藉以研判其濃度是否合乎相關法令之要求及對承受水體之衝擊影響。稀釋率之估算主要受廢污水之起始排放條件及承受水體背景狀況所影響，前者主要以射流形式排放，而後者則以海洋居多，以往由於射流之應用性頗為廣泛，故純射流之相關研究數量亦相當龐大，其中有關波浪運動對射流流場及稀釋過程影響之研究則僅始於二十餘年前，且數量亦少，至於射流入射角度之影響則更為稀少，相關研究多集中於特定入射角度，因而對此現象之瞭解迄今尚嫌不足，故本計畫乃選定垂直圓管射流以不同入射角度進入波浪場時其稀釋過程之特性變化，以期相關結果則可供實際工程設計時應用，提昇對稀釋率估算之準確度，節省工程經費及減少對承受水體造成危害之可能性。

三、理論分析與實驗佈置

2.1 理論分析

為能進一步掌握濃度場的特性變化，首先須對表面稀釋率之影響因素進行分析，Chin(1987)曾建議波浪場中表面稀釋率之變化特性可以下列函數表示：

(1)

式中 D :射流口管徑、 V_0 :射流口速度、 g_0 有效重力($g_0 = (\Delta\rho/\rho_0)g$)、 $\Delta\rho$:射流水體與環境水體之密度差、 ρ_0 :射流水體密度、 g :重力加速度、 d :射流口至靜水面水深、 θ_1 :射流相對於波浪進行方向之夾角、 θ_2 :射流相對於水平方向之夾角、 a :波浪振幅、 T :波浪週期。通常在浮昇射流排放時，皆假設其已達紊流(turbulence)狀態，因而假設黏滯力效應並不顯著，可略之不計，再以控制射流發展之代表性物理量，如體積通率 Q (volume flux)、浮力通率 B (buoyancy flux)、動量通率 M (momentum flux)來取代函數中的 D 、 V_0 、 g_0 ，則可將(1)式化為：

$$S = f_2(M, B, Q, d, \theta_1, \theta_2, a, T, g) \quad (2)$$

其中： $Q = (A D^2 / 4) V_0$ 、 $M = Q V_0$ 、 $B = Q g_0$ ，再者，為便於描述流場特性，因而除考慮幾何因素外，Fischer, et al. (1979)將影響射流之動力因素，如動量、浮力、波浪等組合成以下四個無因次的長度尺度：

$$L_q = \frac{Q}{M^{1/2}}, \quad L_m = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}}, \quad Z_m = \frac{M^{1/2}}{u_{\max}}, \quad Z_B = \frac{B}{u_{\max}^3} \quad (3)$$

其中， A :圓孔截面積， u_{\max} :波浪水粒子最大水平速度， $u_{\max} = agk / \tanh kh$ ，由(3)式裡可發現， $Z_B (= Z_m^3 / L_m^3)$ ，與 L_m 、 Z_m 相依，經由柏金漢 f 定理，引用(3)式作無因次分析後，即可將函數 f_2 化為：

$$S = f_3\left(\frac{d}{L_m}, \frac{L_m}{L_q}, \frac{Z_m}{L_q}, \frac{h}{L}, \theta_1, \theta_2\right) \quad (4)$$

而根據實驗條件 $d/L_m = 1.799$ ， $L_m/L_q = 65.350$ 為已知值，且與波浪進行方向夾角 θ_1 為 0° ， θ_1 、 θ_2 定義可見圖1，再以靜水中之表面稀釋率 S_0 對 S 予以無因次化後可得其關係式為：

$$\frac{S}{S_0} = f_4\left(\frac{Z_m}{L_q}, \frac{h}{L}, \theta_2\right) \quad (5)$$

本計畫之重點即探討入射角度與射流及波浪重要之特性參數對稀釋率之影響。

2.2 實驗佈置理論分析

本計畫之實驗主要係利用影像處理量測系統進行圓管射流以不同角度入射波浪場時濃度場之量測，其硬體部分主要包括光學

濾鏡、CCD攝影機、數位影像卡等元件所組成，軟體部分則有影像處理軟體(Matrix Inspector II)及自行開發之資料處理軟體。於實驗時，將雷射光束經光學鏡組調製後可形成一雷射光切面(厚約為 $100 \mu\text{m}$)並經鏡面反射由水槽上方垂直向下射入，當含染料(Rhodamine 6G)溶液之射流水經此切面時則會立即因雷射光之激發而釋出螢光，藉此即可清楚地顯現出射流(螢光液體)與承受水體(非螢光體)間交互作用之二維運動畫面，藉由攝影機將畫面予以錄影存檔，以供後續分析。

濃度場之定量量測之空間解析度為 160×120 ，灰度解析度為256，各測點之率定關係之相關係數皆大於0.999以上，量測精度則約藉於0.07ppb至0.16ppb間。實驗水槽長度為15m，寬30cm，高0.7m，中段部分舖設射流模型，射流開口狹縫寬度(D)為2mm，長12cm，水深(H)約為16.5cm，射流口雷諾數為2050，另水槽兩端分置造波機及消波設備，相關實驗細節可參考Hwung and Chyan(1999)，實驗條件如表1所示。

表1 實驗條件

T (s)	h/L	H/L	L_q/Z_m
0.68	0.4138	0.0415	0.01195
0.75	0.3386	0.0365	0.01818
0.83	0.2921	0.0264	0.02026
0.92	0.2463	0.0233	0.02594
1.07	0.1995	0.0157	0.02626

四、結果與討論

在瞭解波浪作用下，不同排放角度入射波浪浮昇射流稀釋特性之前，須對實驗流場進行檢視，以驗證系統之正確性。由張(1998)研究結果指出，於靜水浮昇射流時，當 $Z/L_m < 2$ 時，中軸稀釋率與 Z/L_m 無關，僅與相對水深位置 Z/D 有關，此時流況較近似於往昔學者所謂的純射流(Jet Like)，而本文結果亦顯示此一情況。另於 $Z/L_m > 2$ 時，由於浮力作用效應開始主宰後，中軸稀釋率不僅為 Z/L_q 之函數，尚受 Z/L_m 之影響，此等流況則被往昔學者稱之為近似於浮昇流(Plume Like)，將本計畫之實驗量測結果與Papanicolaou & List

(1987、1988)及張(1998)之實驗結果比較，於Jet Like流況時，本計畫之實驗迴歸值為0.153與Papanicolaou & List(1987)之0.165、Papanicolaou & List(1988)之0.147及張(1998)之0.16皆頗為接近；而於Plume Like流況，本計畫之實驗迴歸值為0.063與Papanicolaou & List(1987)之0.09、Papanicolaou & List(1988)之0.07以及張(1998)之0.08亦相當接近，顯示本計畫之實驗結果與前人研究皆相去不遠，顯示本計畫研究結果之正確性。

Chin(1987)認為波浪作用有助於射流捲增效應之增加，導致射流偏折轉向時，將有周圍非射流流體受牽引進射流流體，繼之其間的渦流作用使兩者相結合，產生另一相混合之機構，而其非射流流體尺度更甚於捲增效應者，故而更大幅提高射流之稀釋率，此即Chyan(1992)提出之波浪牽引機構(wave tractive mechanism)，因此波浪場中之射流稀釋特性須考慮受捲增效應及波浪牽引作用之影響。

圖1為靜止水體中不同入射時之表層稀釋率，由於排放角度為90度時之射流浮昇軌跡路徑最短，捲增效應發揮較之其他角度為低，所得表面稀釋效率亦最差，至水平入射時其稀釋率則最高。圖2為90度垂直入射波浪場之 S/S_o 與 L_q/L_m 間之關係，並將順逆向不同角度下迴歸後之關係式表示如表2所示，由其結果得知，在順逆向入射時，不同入射角度之無因次表面稀釋率值皆隨波浪參數 L_q/L_m 呈線性遞增，因波浪引生的速度，導致側向水流強制嵌入射流體而帶動周圍非射流水體捲入，對射流產生強制捲增(forced entrainment)效應，促使

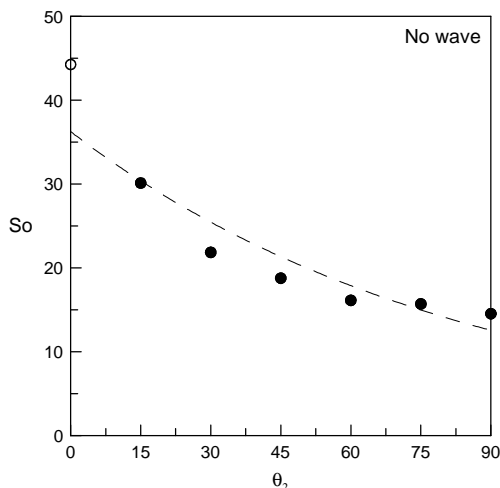


圖1 不同角度入射靜水之表面稀釋率

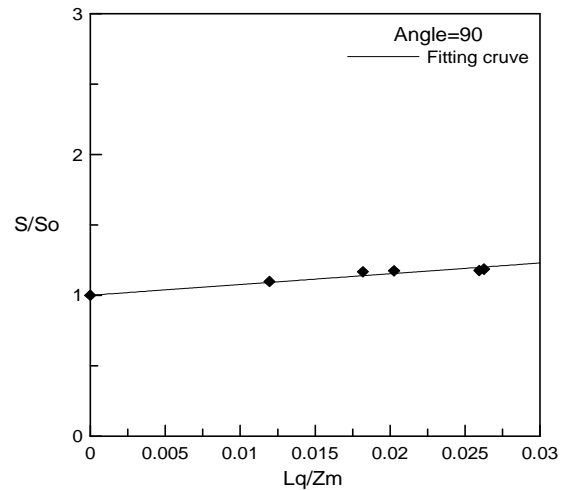


圖2 波浪場中垂直射流無因次表面稀釋率

表2 表面稀釋率之迴歸關係

α	Co-wave	Opposing wave
0°	$S/S_o = 1 + 2.9 L_q/Z_m$	$S/S_o = 1 + 3.0 L_q/Z_m$
15°	$S/S_o = 1 + 7.0 L_q/Z_m$	$S/S_o = 1 + 9.1 L_q/Z_m$
30°	$S/S_o = 1 + 9.9 L_q/Z_m$	$S/S_o = 1 + 10.6 L_q/Z_m$
45°	$S/S_o = 1 + 10.6 L_q/Z_m$	$S/S_o = 1 + 11.6 L_q/Z_m$
60°	$S/S_o = 1 + 13.4 L_q/Z_m$	$S/S_o = 1 + 14.5 L_q/Z_m$
75°	$S/S_o = 1 + 11.1 L_q/Z_m$	$S/S_o = 1 + 12.0 L_q/Z_m$
90°	$S/S_o = 1 + 7.5 L_q/Z_m$	

表3 正規化表面稀釋率之迴歸關係

h/L	C_c	C_o
0.4138	0.3	2.4
0.3386	0.3	2.4
0.2921	0.4	2.4
0.2463	0.4	2.5
0.1995	0.4	2.5

總捲增量增加，使得稀釋率在波浪場中比無波浪作用時為大，致其無因次表面稀釋率值大於1，此特性與Chin(1987)、黃等(1992)之實驗結果相同。

為能進一步瞭解排放角度對浮昇流稀釋特性之影響，比較各角度於相同波浪場中之效益，以波浪場中排放角度為90度時之表面稀釋率 S_p 為基準，將各角度於相同波浪條件下之表面稀釋率值對90度時之量測結果予以正規化，則可得逆向入射之結果，如圖3所示，順項入射時其結果亦相似，各波浪條件下之迴歸關係式如表3，由表中歸納結果得知，當波浪條件由深海波漸漸轉為淺水波時，其遞減率略有增加，但增加幅度並不大，顯見角度變化於無因次表面

稀釋率之影響，在一般海洋放流所處波浪環境中，大致有一定的規律，故重新歸納表2及表3後得以下之關係式：

$$S/S_v = C_c \times e^{0.01 \times \theta_2^2} \quad (\text{co-wave}) \quad (6)$$

$$S/S_v = C_o \times e^{-0.01 \times \theta_2^2} \quad (\text{opposing wave}) \quad (7)$$

若欲以已知排放角度估算波浪場中之表面稀釋率，則可應用垂直(90度)射流時之靜水表面稀釋率結果，代入計算波浪場中垂直射流之表面稀釋率，再依海洋放流需求環境為順向或逆向波浪場之情況，將其代入(6)或(7)式，即可求得所欲估算已知排放角度時之表面稀釋率結果。

五、計畫成果自評

由本計畫之成果顯示，影像處理技術可成功地應用於圓管射流以不同角度入射波浪場時其稀釋效率之實驗研究，經量測可知，在波浪運動下之浮昇射流，不僅邊界寬度的擴展較純射流時大，稀釋率也將大幅提升，經由定量量測結果發現，順逆向射流皆優於純射流時，兩者其無因次表面稀釋率 S/S_o 值皆隨波浪參數 L_q/Z_m 呈線性遞增，且在相同角度下，逆向射流之表面稀釋率略優於順向射流，相關結果業歸納求得經驗式供工程設計上之參考。

六、參考文獻

- [1] Shuto, N. and Ti, L. H. : Wave Effects on Buoyant Plumes, Proc. 14th Conf. Coastal Eng., (1974), pp.2199-2209.
- [2] Ger, A. M. : Wave Effects on Submerged Buoyant Jets, Proc. Hydraulic Eng. in Water Resources Development and Management, IAHR, (1979), pp.295-300.
- [3] Chin, D. A. : Influence of Surface Waves on Outfall Dilution, J. of Hydraulic Eng., Vol. 113, No. 8, (1987), pp.1006-1017.
- [4] Chin, D.A.: Model of Buoyant-jet-surface-wave Interaction, J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., Vol. 114, No.3, (1988), pp.331-345.

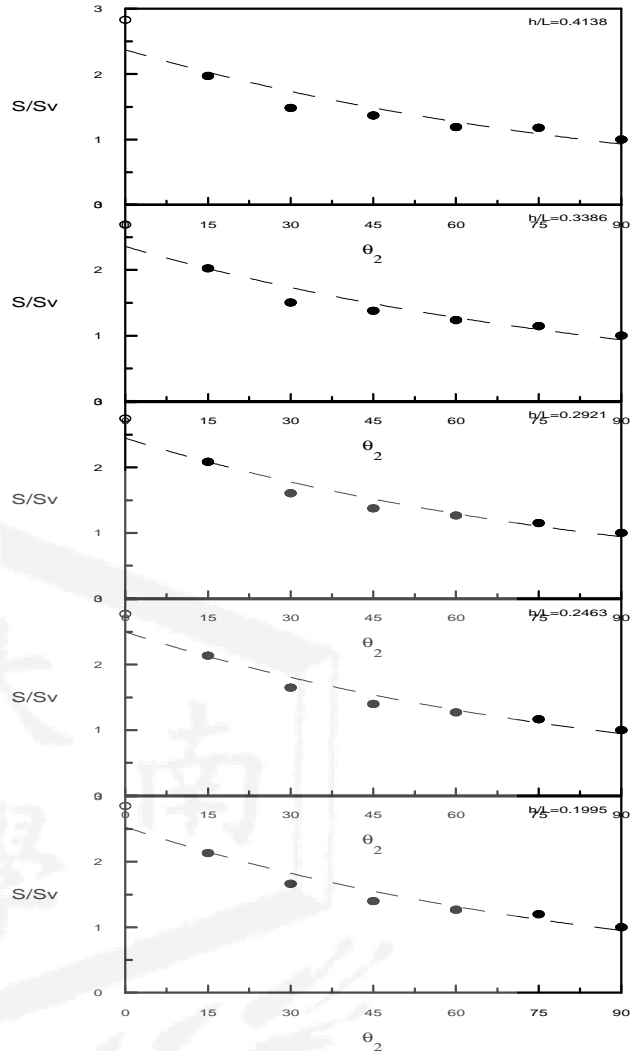


圖 3 逆向入射射流之表面稀釋率

- [5] Hwung, H. H., and Chyan, J. M. : The Vortex Structures of Round Jets in Water Waves, Proc. Intl. Conf. on Physical Modeling of Transport and Dispersion in conjunction with the GARBIS H. KEULEGAN Centennial Symp. IAHR, (1990), pp.10A.19-10A.24.
- [6] Chyan, J. M. Hwung, H. H. and Chang, Y. H. : Wave Effects on the Mean Flow Characteristics of Turbulent Round Jet, Proc. of the Intl. Symp. On Envir. Hydraulics, A. A. Balkema, Vol. 1, (1991), pp.109-114.
- [7] Chyan, J. M. and Hwung, H. H. : On the Interaction of a Turbulent Jet with Waves, J. of Hydraulic Research, Vol. 31, No. 6, (1993), pp.791-810.