

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

垂直平面射流之表層稀釋特性

Surface Dilution of vertical Plane Jets

計畫編號：NSC 88-2211-E-041-007

執行期限：87年8月1日至88年7月31日

主持人：錢紀銘 嘉南藥理學院環境工程衛生系

一、中文摘要

為能增加對海洋放流表層稀釋特性之瞭解，本文以垂直圓管浮昇射流模擬污染物於承受水體表層流場內之稀釋混攪現象，並應用雷射誘發螢光原理所發展而成之一維陣列濃度量測系統對此流場進行定量之實驗研究，由本計畫之成果顯示，無論平面射流之中軸稀釋率於表層流場以外區域均隨無因次距離呈線性成長，至於表層流場以內之中軸稀釋率則呈輕微遞減趨勢，因此，中軸稀釋率於表層衝擊區中將達到一極值，此稀釋率即定義為平面射流之表層稀釋率，依實驗之結果可知，低雷諾數時，表層稀釋率隨雷諾數之增加而遞減，及至雷諾數大於 2400 時，則成為常數，至於表層流場之厚度，則不受水深及雷諾數條件之影響，水深比皆約為 0.129。相對於平均流場之量測結果，濃度之紊流擾動強度於完全發展區內，約保持一定值，於表層流場中則迅速遞減。

關鍵詞：平面射流、表面衝擊區、濃度

Abstract

To improve the understanding of dilution processes of ocean outfall in the surface-impinging region, a array detection system based on laser-induced fluorescence was employed to investigate the concentration field of a vertical round buoyant jet. From the experimental results, the empirical formula of axial and surface dilution was obtained for the plane turbulent jet. In the fully developed region of plane turbulent jet, the axial dilution will increase

linearly with dimensionless longitudinal distance. As the jet fluid entering the impinging region, the concentration field shows a characteristic of decreasing tendency. The maximum axial dilution was defined as the surface dilution of the plane jet, which is decreased with the increasing Reynold number. When $Re > 2400$, the surface dilution maintains as a constant. The water depth and Re did not influence the thickness of surface impinging area, which is near 0.129H from the experimental results. The turbulent fluctuation of concentration was a constant in the fully developed region and shows the flow field approaching the property of similarity. However, as in the impinging region, it decreases rapidly because of the existence of free surface.

Keywords: plane jet, surface impinging region, concentration,

二、緣由與目的

海洋放流為廢污水最終處理法中應用相當廣泛的一種，此法係將已處理之廢污水以管線輸送至海底，藉承受水體之混攪稀釋作用達成降低污染物濃度減低環境衝擊之目標，而就工程設計或環境保護而言，廢污水於此排放過程中，其濃度或稀釋倍率之變化特性係此一處理法相當重要之探討課題。一般廢污水係以射流型式進入承受水體，而為增加其稀釋效果，大多都以多孔並排方式排放，當相鄰射流相互結合時，其流場形態則與平面射流相類似，故相關研究亦可以平面射流為研究模擬之對象。

射流水體（廢污水）自孔口（orifice）噴出至自由水面，射流水體與周圍水體將不斷交互作用，射流水體達自由水面時，將形成特性不同於射流完全發展區之表層流場，於此區域中，其濃

度業經高度稀釋，故其純量場具濃度低及變化微之特性，然此區域之稀釋特性對於海洋放流系統最初稀釋率 (initial dilution) 之估算至為重要，而此類系統造價極為昂貴，稀釋率估算些微之誤差皆會影響巨額之工程費，因此，對此濃度場之特性變化實有必要進行探討，以往對於此類研究囿於實驗設備之限制，未能有較大之進展，故迄今對此一問題尚未有完整之瞭解，為克服此一問題，本文特以雷射誘發螢光原理 (LIF: laser-induced fluorescence) 所組裝之一維陣列濃度量測系統進行此流場之實驗研究，此系統可同時量測呈直線排列之 35 測點濃度資料，其濃度率定關係之相關係數均大於 0.999 以上，各頻道之濃度量測精度約介於 0.07 ppb 至 0.16 ppb，以此高精確度及高靈敏度之量測系統進行實驗研究，即可克服此類流場研究上之困難，藉此亦可對浮昇射流表層區域內濃度場進行實驗量測，探討稀釋率與控制因子間關係變化及其他流場特性之變化。

廢污水於排放後藉浮昇力之作用將漸次往上運動，於接近水面時，由於受自由水面邊界之阻滯影響，其濃度變化將有別於前述射流完全發展區之分佈特性，而廢污水之表面稀釋率估算亦無法廣續以線性關係式為之。對於表層衝擊區內濃度場之研究相對而言尚未臻完善，Wright(1991) 曾建議其表面稀釋率之估算可依現有浮昇射流模式考量水面衝擊區所減少之水深即可求得，Frankel and Cumming(1965)於研究水平圓管射流浮昇射流曾發現厚度約佔水深之 25%，其他學者則有不同建議如 Liseth(1970)及 Liu(1976)認為小於水深 30%，Roberts(1977)及 Koh(1976)則建議為水深 30%，Chin(1987)則認為約 10%。由上述之研究可知，對於衝擊區厚度實驗之結果僅能約略認定為水深之 10% 至 30%，及至黃等人(1998)方建立垂直圓管射流於自由水面衝擊區內表層稀釋率及其厚度之估算式，同時亦測得其濃度場之變化發現呈均勻分佈特性。

由以上之研究可知，邊界之存在確會造成射流流場特性之改變，而目前相關研究大多著眼於實際現場之射流為浮昇射流，是故其研究結果在浮昇力之作用下而無法明確瞭解自由水面邊界對稀釋效應之影響，為探討此一效應，本文乃將流場影響因素予以單純化，僅以動量為主要驅動力之垂直純平面射流為研究對象，以計畫主持人(Hwung and Chyan,1999)所發展之可同時量測 35

個測點濃度之先進非干擾式高精度實驗設備，探討表面流場內之濃度分佈及稀釋機構之特性，期能對未來工程應用有所貢獻。

三、流場控制參數分析

由於本計畫主要以實驗法歸納研究平面射流表面流場之濃度分佈、稀釋特性、區域特性參考厚度及其他參數與環境參數之間函數關係，此類研究方法首要確立流場內欲討論現象之控制特性參數群，其方法即為以因次分析法建立參數群之函數關係，本計畫主要討論參數；濃度及特性參考厚度之影響函數可表示如下；

$$C_c = f(C_0, V, \dots, D, H, \epsilon) \quad (1)$$

$$b = f(V, \dots, D, H, \epsilon) \quad (2)$$

式中之參數為；射流之起始濃度 C_0 、起始速度 V 、射流水體之密度、動黏滯係數、平面射流夾縫之寬度 D 、自由水面衝擊區表層厚度 b 及射流口與水表面之距離 H ，上式經無因次化分析後可得

$$S_s = \frac{C_0}{C_s} f(1/Re, H/D) \quad (3)$$

$$\frac{b}{D} = f(1/Re, H/D) \quad (4)$$

式中之 Re 為雷諾數， S_s 、 H/D 分別為射流水面衝擊區之稀釋率及相對水深，由上式可知，稀釋率及無因次水面衝擊區表層厚度分別為射流之雷諾數及相對水深之函數，實驗時將選定不同之雷諾數與不同之相對水深進行流場之濃度量測，以歸納出二者函數關係並探討其特性之變化。

四、實驗佈置

本計畫之實驗可分為兩部分；即流場可視化與表層濃度場之量測，前者主要對流場進行定性之探討，於實驗時，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 μ 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，藉由專業用精密單眼相機即可紀錄之，並觀察平面射流之定性流場特性。

至於濃度場之定性量測則是藉計劃主持人於貴會補助之專案計劃中所自行組裝之一維陣列濃度量測系統進行呈線性排列 35 測點之濃度量測實驗，其量測精度約藉於 0.07ppb 至 0.16ppb 間，實驗細節可參考 Hwung and Chyan, 1999，實驗時，平面射流開口狹縫寬度(D)為 2mm，長 12cm，雷諾數約介於 1000 至 3000 間，水深(H)約為 20cm 至 30cm。

五、結果與討論

由流場可視化實驗可知射流水由狹縫進入實驗水槽後，由於與四週水體間存有速度梯度進而衍生渦流 (vortex)，藉此流場結構將邊界外水體捲入射流流域中並與之相互混攪，進而達到射流水稀釋之效果，此即所謂射流之捲增效應，雖然平面射流之起始條件為二維流場，唯仍可發現其渦流據三維特性。當射流水體接近自由水面時，因受自由水面之影響，流體漸次轉向為水平幅射運動，於此過程中，射流之捲增稀釋作用有大幅減弱之趨勢，同時，先產生一束縮現象繼而發生較大尺度之渦流捲增區，由此亦可提昇稀釋效果。

本計劃為求嚴謹，於射流表層衝擊區量測前，亦對平面射流之完全發展區進行定量量測，除可驗證整體量測系之功能，同時亦可比較流場之特性變化，圖 1 即為 H/D=107 之流場條件下，由實驗所測得之射流中軸稀釋率(S)之空間分佈，其測區範圍由靜水面下約 2mm 處至 7cm 處，由實驗結果顯示射流中軸稀釋率係呈線性成長，此區域之特性變化一般可以下是表示之；

$$S = \frac{C_o}{C_m} = C_{11} \left(\frac{Z}{D} + C_{12} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (5)$$

式中 C_m 表射流中軸上追蹤劑之平均濃度，其斜率 C₁₁ 約為 0.57，此實測值與 Devies et.al.(1975)之 0.51 十分相近，由此可知本計劃之研究系統中之射流製造與量測系統功能皆屬正常。

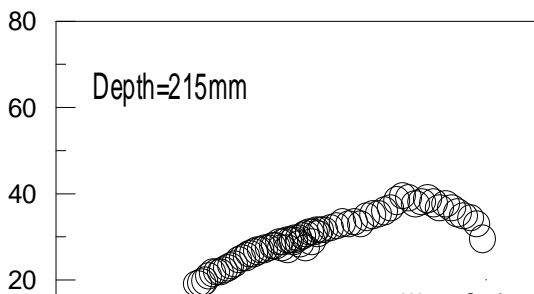


圖 1 平面射流中軸稀釋率之空間分佈

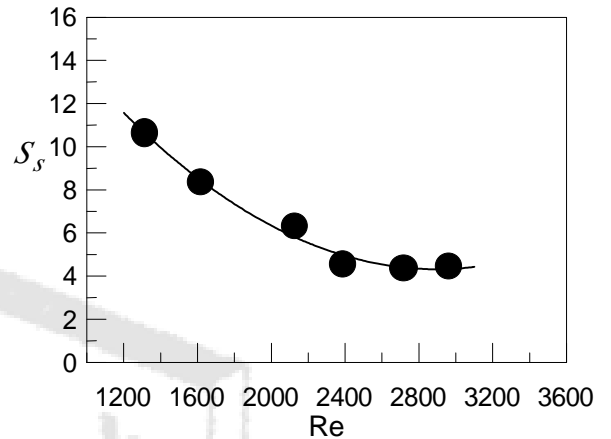


圖 2 平面射流表層流場稀釋率之特性變化

當射流接近自由水面時，因受其阻滯致使稀釋率不再呈線性之增加，到達某一稀釋率後便會略為下降，此現象可能係肇因於射流未達表層區時，其流場並非完全混合均勻，捲增渦流不斷將低濃度流體帶入高濃度區域，而當進入表層流場時，捲增效果明顯降低，致使濃度產生輕微累積作用，其稀釋率亦隨之下降。

為能進一步探討表層流場稀釋率 (S_s) 之特性變化，本文定義最高稀釋率即為射流之表面稀釋率，圖 2 所示即為不同射流口雷諾數條件下之特性變化，尤其結果可知，低雷諾數時，表面稀釋率隨雷諾數之遞增而遞減，及至雷諾數達 2400 時，方才接近一定值，約為 4.2，經迴歸分析本文之實驗結果，垂直平面射流之表面稀釋率可以下式估算之；

$$S_s = 25 - 0.0146 \times Re + 2.5 \times 10^{-6} \times Re^2 \quad (6)$$

另者，為瞭解射流完全發展區之線性稀釋過程之極限位置，本文乃另行定義一表層流場厚度 b，此厚度層所在位置係中軸稀釋率之極值位置，圖 3 即為不同水深及雷諾數條件下，表層流場厚度之特性變化，由結果可知，其厚度之變化並不明顯，可視之為一常數，其水深比(b/H)約 0.129。

由以上之結果可知，表層流場厚與水深及雷諾數條件之關聯並不明顯，以實際應用觀點視之，可視為之為常數，此結果與錢與黃(1997)頗為相近。

一般而言，平面射流之發展需至 $20D$ 之後方呈成熟，流場具有相似性(Similarity)，其中軸紊流特性亦趨穩定，圖 4 所示為鉻面射流中軸之濃度

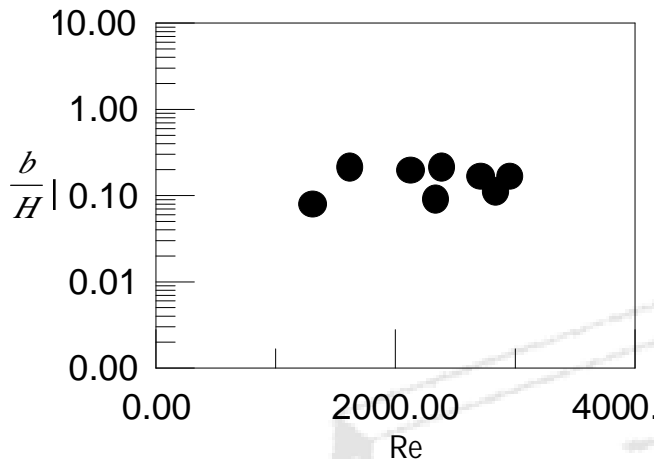


圖 3 平面射流表層衝擊區厚度之特性變化

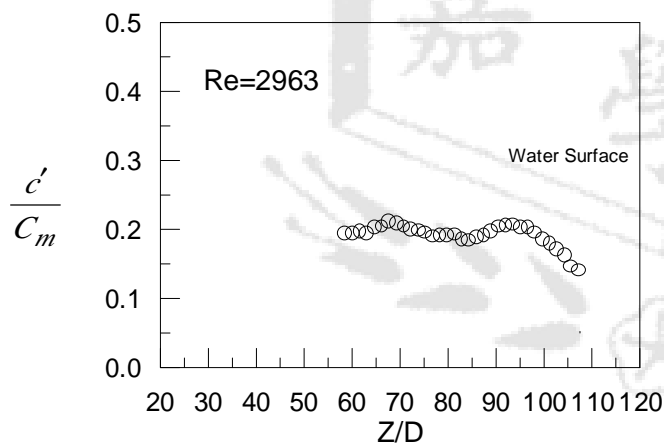


圖 4 平面射流中軸無因次濃度擾動強度之特性變化

擾動強度之特性變化，由其結果可知，射流於完全發展區時，其無因次濃度擾動強度約為定值， $c'/C_m = 0.21$ ，然進入表層區，因受自由水面之影響，其分佈即失去相似性而呈迅速遞減趨勢。

六、計畫成果自評

由本計畫之成果顯示，無論平面射流之中軸稀釋率於表層流場以外區域均隨無因次距離呈線性成長，至於表層流場以內之中軸稀釋率則呈輕微遞減趨勢，因此，中軸稀釋率於表層

衝擊區中將達到一極值，此稀釋率即定義為平面射流之表層稀釋率，依實驗之結果可知，低雷諾數時，表層稀釋率隨雷諾數之增加而遞減，及至雷諾數大於 2400 時，則成為常數，至於表層流場之厚度，則不受水深及雷諾數條件之影響，水深比皆約為 0.129。相對於平均流場之量測結果，濃度之紊流擾動強度於完全發展區內，約保持一定值，於表層流場中則迅速遞減。另者，由本文實驗所歸納之諸多經驗公式更可供流場模擬或實際工程設計之用。

七、參考文獻

1. Chin, D.A.,(1987) "Influence of surface waves on outfall dilution," *J. of Hydraulic Eng.*, Vol.113, No.8, pp.1006-1017.
2. Davies,A.E., J.F., Keffer and W.D., Baines (1975) "Spread of a heated plane turbulent jet," *Phys. Fluids*, Vol.18, pp.770.
3. Frankel R.J. and J.D., Cumming (1965) "Turbulent mixing phenomena of ocean outfalls ", *J. of Sanitary Engineering Division*,Vol.91, No.SA2, pp.39-59.
4. Hwung, H. H. and J. M., Chyan (1999), "Development of array detection system for concentration measurements," *Proceedings of the National Science Council; Part A : Physical Science and Engineering*, R.O.C.,Vol.23, No.2, pp.214-222.
5. Koh, R. C. Y. (1976) "Buoyance-driven gravitational spreading", *Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering*, Honolulu, Hawaii, July11-17, Vol.4, pp.2956-2975.
6. Liesth, P. (1970) "Mixing of merging buoyant jets from a manifold in stagnant receiving water of uniform density", *Hydraulic Engineering Laboratory*, Report No. HEL 23-1, University of California, Berkely., p.180.
7. Liu, S.L.(1976) "Mixing of submerged two-dimensional buoyant jets in uniform bodies of water in the absence and present of wind action.", *Hydraulic Engineering Laboratory*, Report No. HEL 23-5, University of California, Berkely., p.141.
8. Roberts, P.J.W. (1977) "Dispersion of buoyant waste water discharged from outfall diffusers of finite length", *W.M. Keck Laboratory of*

Hydraulics and water resource, Report No. KH-R-35, California Institute of Technology, Pasadena, Calif., pp.183.

9. Wright, S. J., P. J. W. ,Roberts, Y. Zhongmin, and N. E. Bradly, (1991) "Surface dilution of round submerged buoyant jets", J. Hydraulic

Research, Vol. 29, No. 1, pp. 67-89.

10. 黃煌輝、錢紀銘、張遠志 (1998), "波浪作用對垂直圓管射流之表層濃度場之影響", 第二十屆海洋工程研討會, 429-434。

