



行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

垂直圓管浮昇射流水面衝擊區之稀釋特性

Dilution in the impinging region of vertical round buoyant jets

計畫編號：NSC 87-2211-E-041-008

執行期限：86年8月1日至87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，由實驗結果除歸納出純射流及浮昇射流之中軸稀釋率、表面稀釋率及表層流場之經驗估算式，同時亦發現無論純射流或浮昇射流，其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，然於浮昇效應漸控制流場之特性變化時，其線性趨勢則不同於純射流之結果。至於表層流場以內之中軸稀釋率則皆呈均勻分佈，當浮昇射流之水體在到達自由水面之前，若僅經歷純射流特性區及漸變區，則其表面稀釋率之增加趨勢較經歷浮昇流特性區為小，由此可知，浮昇效應具有提昇稀釋率之效益，此外，此效應亦使表層流場有增加之現象。

關鍵詞：浮昇射流、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 pure momentum jet and buoyant jet. In the fully developed region of pure or buoyant jets, the axial dilution will increase linearly with dimensionless longitudinal distance except that, when the buoyant effects dominating the flow field, the tendency of dilution

increase would be different. As the jet fluid entering the impinging region, the concentration field shows a characteristic of uniform distribution for both of pure and buoyant jets. From the comparison of buoyant jet dilution, it shows that the buoyant effect play a positive role in improving the surface dilution.

Keywords: buoyant jet, surface impinging region, concentration,

二、緣由與目的

海洋放流為廢污水最終處理法之一，此法係將已處理之廢污水以管線輸送至海床上，藉承受水體之混攪稀釋作用達成降低污染物濃度之目的，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。由於廢污水之密度較海水為輕，其運動行為特性係屬浮昇射流(buoyant jet)，故相關研究皆以浮昇射流為主要研究對象，而射流水體(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，探討最初稀釋率與控制因子間關係變化及其他流場特性之變化。

由於浮昇射流之應用性相當廣泛，故以往已有諸多學者從事相關方面之研究，Abraham⁽¹⁾曾基於連續方程式及動量方程式解得浮昇射流之運動軌跡、中軸稀釋率與密度差及射流口速度之關係式。Anwar(1969)於守恆理論之假設條件下，推導出浮昇射流在低密度福祿數($F_d = 4 \sim 16$)時之中軸運動軌跡及其稀釋率隨垂直距離(y)之變化關係。Kotsovinos(1975)提出一可用於估算垂直圓管之浮昇射流於完全發展區之中軸稀釋率之半經驗公式。Papanicolaou and List(1987)以實驗量測浮昇射流中軸溫度之分佈，並得知，當 $z/\ell_M < 1$ 時，其分佈特性與純射流之結果類似 (jet like)，而 $z/\ell_M > 5$ 時，其特性則類似於浮昇流 (plum)。

以上學者之研究係於無限水深條件下之結果，至於有限水深之研究則有；Pryputniewicz and Bowley(1975)以質量、動量及能量守恆控制方程式配合斷面積分法推導出有限水深之射流控制方程式，並以實驗驗證其方程式之準確性。Wright and Robers(1991)探討垂直圓管浮昇射流射入靜止均勻水體時，其與水表面之交互影響，並指出傳統上對於稀釋率之估算往往只考慮捲增效應之影響而忽略射流於自由水面水平輻射時所增加之稀釋效果，而後者之稀釋率往往大於射流口正上方之稀釋率 3~5 倍有餘。

綜合上述可知，以往之相關研究較著重於射流完全發展區之濃度變化特性，至於浮昇射流衝擊水表面附近之濃度變化情形則由於此區域之純量場具濃度低變化微之特性，以致目前尚無法完整掌握其特性變化，因此，本文之研究乃以精度高達 0.07ppb 之陣列量測系統對表面衝擊區之濃度場進行實驗探討，以期能瞭解此區之稀釋機構，並歸納出可供實際工程應用之估算式。

三、流場控制參數分析

對於純射流而言，其影響射流中軸濃度變化

之主要參數包括；射流之起始濃度 C_0 、起始速度 V 、射流水體之密度 ρ 、動黏滯係數 ν 、射流管之直徑 D 及射流口與水表面之距離 H ，故其中軸之濃度 C_c 可以函數表示如下：

$$C_c = f(C_0, V, \rho, D, H, \nu) \quad (1)$$

上式經無因次化分析後可得

$$S = f(1/Re, H/D) \quad (2)$$

式中之 Re 為雷諾數， S 、 H/D 分別為射流之中軸稀釋率及相對水深，由 (2) 式可知，純射流之中軸稀釋率僅為雷諾數及相對水深之函數。然對於浮昇射流而言，除影響上述射流之特性參數外，尚需考慮浮力效應之影響，故其表面稀釋率可表示如下：

$$S_s = f(Q, M, B, H) \quad (3)$$

式中之 $Q (= V \times A)$ 、 $M (= V \times Q)$ 及 B 分別為射流口之起始體積流量、起始動量及浮昇通量，而 H 則為射流口與靜止自由水面之距離，而 V 表射流口之平均流速， A 為射流管口之面積，若將 (3) 式予以無因次化後則可得；

$$S_s \ell_Q / H = f_1(\ell_M / H, \ell_Q / H) \quad (4)$$

上式中之 $\ell_Q = Q / M^{1/2}$ ，由於一般 ℓ_Q 均遠小於 ℓ_M ，故 (4) 式可簡化為：

$$S_s \ell_Q / H = f_1(\ell_M / H) \quad (5)$$

由 (5) 式可知浮昇射流之表面稀釋率之特性變化係受水深、 ℓ_Q 及 ℓ_M 等三流場特性長度尺度影響，而 $\ell_Q / \ell_M = (\pi/4)^{1/4} (1/F_d)$ ，因此，流場之主要控制因子僅為水深及密度福祿數，實驗時，藉由此二控制因子之變動，量測表面衝擊區之濃度分佈，即可探討其關係之特性變化。

四、結果與討論

射流水由圓形孔口進入實驗水槽後，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，圖 1 即為 $H/D=61$ ， $Re=6484$ 之流場條件下，由實驗所測得之射流中軸稀釋率之空間分佈，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，圖中之黑色實線為錢

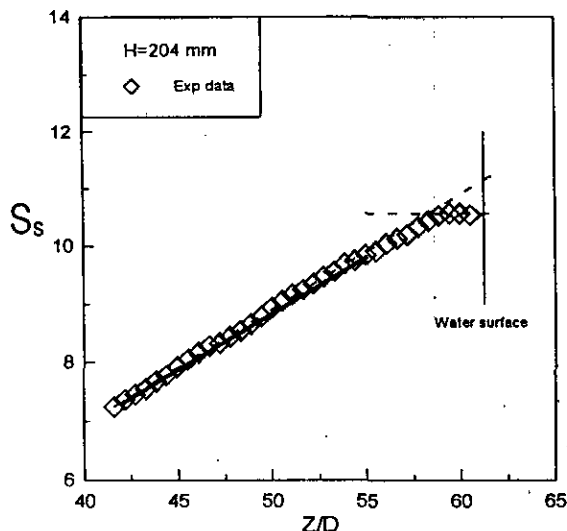


圖 1 純射流中軸稀釋率之空間分佈

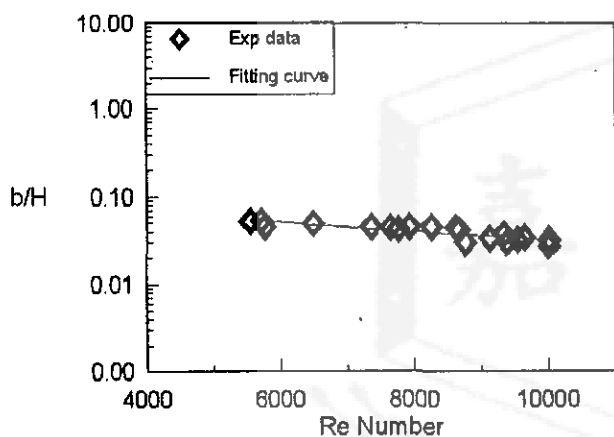


圖 2 純射流表層流場厚度特性變化

與黃(1997)歸納以往相關研究所得之結果，經比較可知本文於完全發展區之量測結果與往昔之研究頗為相似。當射流水體接近自由水面時，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大幅減弱，致使其稀釋率不再呈線性之增加，當到達某一稀釋率時便呈一水平之分佈，本文定義此時之稀釋率即為射流之表面稀釋率 (S_s)，經以多變數迴歸分析本文之實驗結果，垂直圓管純射流之表面稀釋率可以下式估算之；

$$S_s = 1.8 \times 10^{-4} \times Re + 0.18 \times (H/D) - 1.3 \quad (6)$$

就本文之實驗條件範圍而言 ($Re: 5544 \sim 10000$, $H/D: 61 \sim 96$)，(6)式之估算誤差均小於4%，由上式亦可發現，表面稀釋率隨雷諾數增加之趨勢並非十分明顯，而相對水深之影響則較為明顯，由此可知於一般海放管設計時，增加射流之起始動量並非一增加稀釋率十分經濟有效之方

式。

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將線性成長線延長至表面稀釋率之水平段交點即為表層流場之底部位置，如圖 1 中之水平虛線所示。圖 2 即為不同水深條件下，表層流場厚度之特性變化，經線性迴歸其變化可以 (7) 表示之；

$$b/H = -3.6 \times 10^{-6} \times Re + 0.07 \quad (7)$$

由上式之結果可知，表層流場厚係隨雷諾數之增加而遞增，唯其增加率甚微，若以實際應用觀點視之，則可視為均勻分佈，而水深條件之影響則不明顯，此結果與錢與黃(1997)頗為相近。

當浮昇作用存在於純射流時即形成浮昇射流，其中軸稀釋率之空間分佈特性經實驗量測後發現與純射流之結果頗為類似，如圖 1 所示，亦即由線性成長段及均勻分佈段所組成，由 (5) 式可知浮昇射流之稀釋率之特性變化係受水深、 l_o 及 l_M 等三流場特性長度尺度所影響，依本文之實驗結果發現，當 $Z/l_M < 2$ 時 (Z 表射流方向之縱軸距離)，其中軸稀釋倍率之變化與 Z/l_M 無關，而僅為參數群 Z/l_o 之函數，經迴歸得知其變化可以 $Sl_o/Z = M$ 描述之，本文之實驗結果

$M=0.168$ ，若經轉換則可得 $S = 0.189 \times Z/D$ ，此一關係變化特性與純射流之特性十分相近，此現象主要係 $Z/l_M < 2$ 區域鄰近射流口，流場由起使動量所主宰，浮昇力之作用尚不足以改變流場之分佈特性，故流場特性仍與純射流相似，浮昇射流此區域亦稱純射流特性區 (jet like region)。當 $Z/l_M > 5$ 時，其線性段之分佈特性則因浮昇效應漸明顯， l_o 、 l_M 二參數之影響益增，流場漸為浮昇力所主宰，其特性則近於浮昇流 (plume flow)，故浮昇射流此區域之流場又稱浮昇流特性區 (plume like region)，其中軸稀釋倍率之變化則可以下式表示之；

$$Sl_o/Z = N \times (Z/l_M)^{2/3} \quad (8)$$

經迴歸本文之實驗結果得知 $M=0.08$ ，為與便於比較，僅將前人相關研究結果整理於表 1，經比較可發現本文之量測結果與以往之研究成果頗為接近，顯示本文之實驗結果正確。

表1 浮昇射流中軸稀釋率估算式係數統計

Authors	M	N
Kotsovinos ⁽³⁾	0.170	0.10
Papanicolaou and List ⁽⁴⁾	0.165	0.09
Papanicolaou and List ⁽¹⁰⁾	0.147	0.07
The present study	0.168	0.08
Range	0.147~0.17	0.07~0.10
Average	0.1605	0.085

浮昇射流之表面稀釋率之特性變化 ($2\langle H/\ell_M \rangle < 5$)，其實驗結果之迴歸關係式如下：

$$S_s = 0.02 \times (H/D)^{6/5} \times F_d^{-1/5} \quad (9)$$

由上式可知，表面稀釋率係隨密度福祿數之增加而遞減，亦即浮昇力愈強愈有助於稀釋效率之增加，至於水深條件則仍扮演積極正面角色，另由此條件亦可知，浮昇射流自射流口至自由水面，射流水體主要係經歷純射流特性區及漸變區 (transition region) 之作用，而當 $H/\ell_M > 5$ 時，浮昇射流水體方能再經歷由浮昇力所主宰之浮昇流特性區之作用，經迴歸可得其表面稀釋率估算式：

$$S_s = 0.085 \times (H/D)^{5/3} \times F_d^{-2/3} \quad (10)$$

由(10)式之結果表面稀釋率與無因次水深與密度福祿數之變化趨勢相似，唯其趨勢更為強烈。

由浮昇射流表層流場厚度之實驗結果可知，其層厚度於 $80 < F_d < 20$ 時，其厚度約維持於 0.034 倍之水深，而當 $F_d < 20$ 時，表層流場厚度便急速增長，其迴歸關係式可以下式表示之：

$$b/H = 3.14/F_d^2 + 0.03 \quad (11)$$

事實上，當 $80 < F_d < 20$ ，射流之浮昇效應並不明顯，故其流場特性較近於純射流，而 $F_d < 20$ 時，其浮昇效應方使其厚度迅速增長，由此可知，由於浮昇力之作用使自由水面附近形成輕微之密度成層現象，使浮昇射流表層流場之厚度增加。

五、計畫成果自評

由本計畫之成果顯示，無論純射流或浮昇射流，其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，然於浮昇效應漸控制流場之特性變化時，其線性趨勢則不同於純射流

之結果。至於表層流場以內之中軸稀釋率則皆呈均勻分佈，當浮昇射流之水體在到達自由水面之前，若僅經歷純射流特性區及漸變區，則其表面稀釋率之增加趨勢較經歷浮昇流特性區為小，由此可知，浮昇效應具有提昇稀釋率之效益，此外，此效應亦使表層流場有增加之現象。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。

六、參考文獻

1. Abraham, G., (1965) "Horizontal jet in a stagnant fluid of other density", Delft Hydraulics Laboratory, Delft, The Netherlands, Publ. No.55.
2. Anwar, H. O., (1969) "Behavior of buoyant jet in calm fluid", J. Fluid Mech., pp.455-480.
3. Hwung, H. H. and J. M. Chyan, (1998) "Development of array detection system for concentration measurements", submitted to Proceeding of the National Science Council, R.O.C.(accepted).
4. Kotsovimos, N. E., (1975) "A study of the entrainment and turbulence in a plane buoyant jet", Ph.D. thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, USA.
5. Papanicolaou, P. N. and E. J. List, (1987) "Statistical and spectral properties of tracer concentration in round buoyant jets", Intl. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, No. 10, pp. 2059-2071.
6. Papanicolaou, P. N. and E. J. List, (1988) "Investigation of round vertical buoyant jets", J. Fluid Mech., Vol.195, pp.341-391.
7. Pryputniewicz, R. J. W. and W. W. Bowly, (1975) "An experimental study of vertical buoyant jets discharging into water of definite depth", ASME, J. of Heat Transfer, Vol.109, No.3, pp.490-494.
8. 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.
9. 錢紀銘、黃煌輝、李俊德(1990)「應用 LIF 原理於 LDV 系統進行濃度與速度同時量測之研究」，第五屆水利工程研討會論文集，pp. 490-505。
10. 錢紀銘、黃煌輝，(1997)「海洋放流中純射流之表層稀釋特性」，第二十二屆廢水處理技術研討會論文集，W6-1。