

一様流中における沈降性粒子を含む密度噴流

Sediment-Laden Negative Buoyant Forced Plume in Uniform Flow

* * * * * *

藤崎一裕 緒方仁伸 粟谷陽一

By Kazuhiro FUJISAKI, Hironobu OGATA and Yoichi AWAYA

The paper presents the behavior of sediment-laden negative buoyant plume issued vertically into uniform flow. Special attention is paid on the effect of settling particles on plume motion. Experimental and theoretical studies were made on the variations of plume properties, such as plume trajectories, growth of width and decay of concentration and velocity. The path of maximum velocity was pulled down due to settling of sediments and there found a vertical gap between the path of maximum concentration and maximum velocity. Except these features, the plume motion was almost the same as that of non-settling matter.

Keywords: Sediment-laden plume, buoyant plume in cross flow, sediment dispersion.

1. まえがき

周囲流体と密度差のある物質が流れの中に放出される現象は、環境汚染の防止などの関連で多くの検討がなされてきた。しかしこれらの検討はその大部分が均一流体の放出による現象を調べたもので、沈降性を有する粒子による現象を調べた例は少ない。そこで本報告では、沈降性粒子の懸濁液を水平一様流中に、鉛直下方に放出したときの現象について調べた。粒子懸濁液によって生じる見かけの密度の増大と粒子群の沈降がいわゆるベントオーバーと呼ばれるような現象に及ぼす影響を調べることを本研究の目的である。

室内実験で、投入濁質により生じたプリュームの軌跡、広がり幅、濃度および流速の減少過程などを測定した。そして、沈降性がない場合の物質に対する類似の現象と比較検討した。さらに、基礎方程式をプリュームの断面で積分した積分モデルを用いて、現象の概略を表すことを試みた。

2. 実験

2. 1 実験装置及び方法

実験装置の概略を図1に示す。長さ5m、深さ1.5mの水槽内に幅0.5mの仕切板を入れて槽内の水を循環して、

* 正会員 工博 九州工業大学教授 工学部設計生産工学科
* * 九州工業大学大学院 工学部設計生産工学専攻
 (〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1)
* * * 正会員 工博 九州共立大学教授 工学部土木工学科
 (〒807 北九州市八幡西区自由が丘1-8)

一様流の場を作った。水深は、1.35mとし、一様流速は3.5~4cmの間で変化させた。使用した粒子は市販の標準砂をフルイで整粒したもので、その比重は2.65である。実験は流速計と濁度計を用いて、流速分布と粒子濃度分布を直接測定する方法（実験Ⅰ）と水路正面及び上面から粒子群の広がり写真を撮影してプリュームの軌跡や広がりを求める方法（実験Ⅱ）の二つの方法で行った。流速の測定には三次元電磁流速計（プローブ直径20mm）を用い、濁度の測定には手製の光電式濁度計を用いた。このとき、測定はプリューム軸を含む鉛直断面で行った。（図2参照）実験条件は表1にまとめられており、RUN1-12が実験Ⅰ、RUN13-28が実験Ⅱの場合である。表1中の U_{∞} は水平一様流速、 U_0 は噴出口での流体の噴出速度、 C_0 は噴出口での粒子体積濃度、 D はノズルの直径である。粒子の平均沈降速度 w_0 は、RUN1-9とRUN13-28では1.28cm/s、RUN10-12では2.90cm/sで、その他の諸量は以下のとおりである。

表1 実験条件

RUN	U_0 (cm/s)	C_0 (%)	U_{∞} (cm/s)	D (cm)	l_p (cm)	l_s (cm)	F_{dc} ($\times 10^{-2}$)	$\bar{W}_0$	記号
1	19.5	4.89	3.48	1.3	50.7	6.39	5.49	0.37	●
2	18.3	5.23	3.81	1.3	38.9	5.48	6.63	0.34	●
3	14.9	8.42	3.53	1.3	65.1	4.81	3.75	0.36	●
4	19.0	9.64	3.90	1.3	69.3	5.56	3.75	0.33	●
5	20.2	3.91	4.00	1.3	28.2	5.82	9.47	0.32	●
6	31.3	3.43	4.00	1.3	37.5	9.02	8.76	0.32	●
7	35.8	2.98	4.00	1.3	37.1	10.3	9.46	0.32	●
8	21.0	3.06	4.00	1.3	22.9	6.06	11.9	0.32	●
9	82.5	2.90	4.00	1.3	83.9	23.8	6.38	0.32	●
10	48.0	3.01	4.58	0.6	7.3	5.57	24.4	0.63	▲
11	31.3	8.07	4.80	0.6	11.4	3.47	12.4	0.60	▲
12	50.4	3.21	4.82	0.6	10.5	5.56	16.9	0.60	▲
13	21.8	1.30	4.05	1.8	18.6	8.59	20.5	0.32	○
14	22.0	4.90	4.05	1.8	70.6	8.66	5.40	0.32	○
15	48.6	2.10	4.05	1.8	64.8	19.1	8.60	0.32	○
16	32.6	5.40	4.05	1.8	113	12.8	4.10	0.32	○
17	44.1	2.10	4.05	1.8	59.8	17.4	8.90	0.32	○
18	17.7	5.30	4.05	1.8	62.2	6.97	5.50	0.32	○
19	20.0	1.70	4.05	1.8	22.7	7.88	16.0	0.32	○
20	36.3	0.90	4.05	1.8	21.9	14.3	22.0	0.32	○
21	21.2	1.30	4.05	1.8	18.1	8.35	20.8	0.32	△
22	22.2	1.90	4.05	1.8	27.6	8.74	14.0	0.32	△
23	22.1	5.50	4.05	1.8	79.6	8.70	4.80	0.32	△
24	18.7	6.40	4.05	1.8	79.2	7.36	4.50	0.32	□
25	40.8	4.10	4.05	1.8	107	16.1	4.80	0.32	□
26	39.2	0.90	4.05	1.8	22.6	15.4	2.24	0.32	□
27	15.1	3.10	4.05	1.8	31.4	5.95	10.2	0.32	□
28	19.0	7.30	4.05	1.8	91.7	7.48	3.90	0.32	X

$$l_j = \sqrt{m/U_{\infty}} \quad (1)$$

$$l_p = qg/U_{\infty}^3 \quad (2)$$

$$m = \frac{\pi}{4} D^2 U_0^2 \quad (3)$$

$$q = \frac{\pi}{4} D^2 (U_0 + w_0) c_0 \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0} \quad (4)$$

$$F_{dc} = \frac{U_{\infty}}{\sqrt{(\rho_s - \rho_0)/\rho_0 c_0 g l_p}} \quad (5)$$

$$\bar{w}_0 = w_0/U_{\infty} \quad (6)$$

ρ_s および ρ_0 は粒子および流体の密度で、 q は噴出粒子質量、 m は噴出運動量に対応する。 l_p 、 l_s は上式で定義される特性長である。本報では一様流中における濁質のプリューム的な挙動の解明を目的としているため l_p が l_s と比べてなるべく小さくなるよう、つまり、噴出口の運動量の影響が比較的小さい範囲で実験を行っており、現象は主として F_{dc} との $\bar{w}_0$ により特徴づけられる。

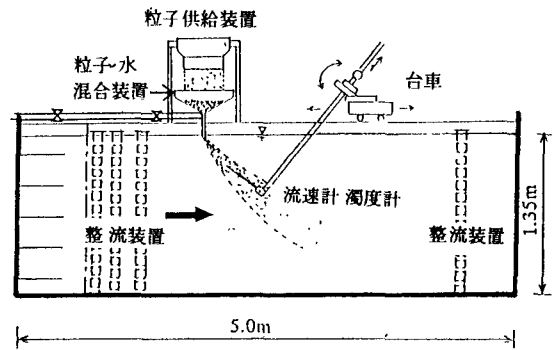


図1 実験装置

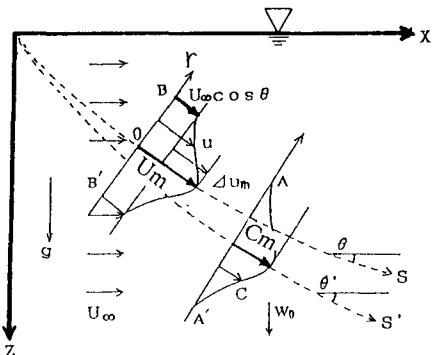


図2 座標軸

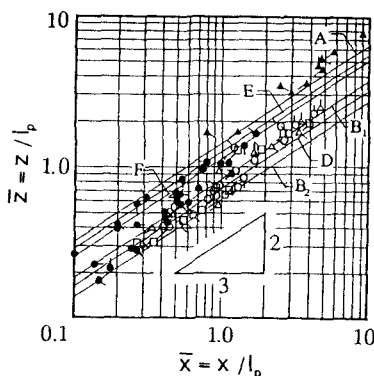


図3 放出粒子の経路

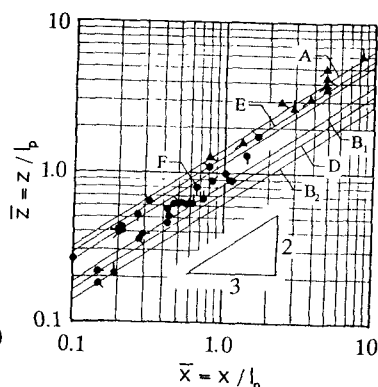


図4 放出水の経路

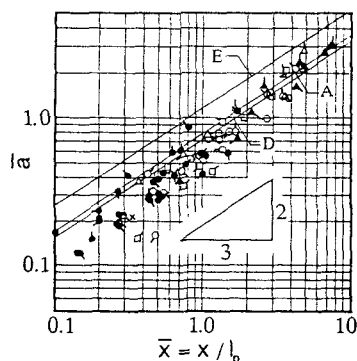


図5 粒子の広がり幅

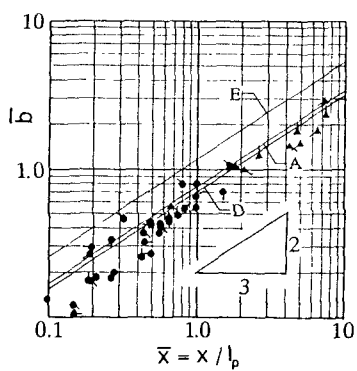


図6 放出水の広がり幅

表2 記号と文献対照表

A	首藤 ³⁾
B	Wright ¹⁾
D	Slawson & Csanady ⁴⁾ ($\alpha=0.5$)
E	Chu & Goldberg ⁵⁾ ($\alpha=0.5$)
F	水鳥 他 ⁶⁾

添字 1:RUN10, 2:RUN3

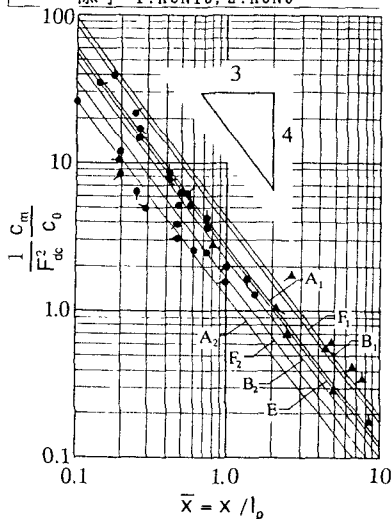


図7 軸上濃度の減少

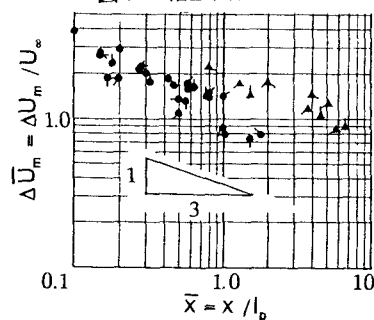


図8 軸上流速の減少

2.2 実験結果

図3～8に実験結果を示す。なお著者らの知る範囲では本報で対象としたような現象に対する報告はこれまでにない。そこで図中には従来の均一流体の場合の検討結果を併せて記した。(図中の記号は表1、2参照) 図3は粒子ブリュームの軌跡を示す。図の両軸は l_p により無次元化されている。プロットした点は実験Ⅰの場合、 $x-z$ 平面での粒子濃度の最大値を示す位置である。ブリュームの上下方向の広がりの中心点として求めている実験Ⅱの値は、分布の実測値から求めた実験Ⅰの値より少し小さめにでている。図4は最大流速点の変化を示す。図4は図3とほぼ同様の傾向であるが、粒子の濃度の軌跡よりやや上方(z の値の小さい方)に出ている。この点が、この場合の現象の特徴の一つである。

粒子濃度および流速に関するブリュームの幅の増大していく様子が図5、6に示されている。実験Ⅰの場合には、測定により得られたそれぞれの分布の最大値の5%の部分を求めてブリュームの端部とした。図5、6では x の増加につれて、粒子の広がりの方が運動量の広がりよりも大きくでている¹⁾。流下にとまなう粒子濃度の減少の様子は図7に示されている。プロットした点は図5の場合と同様に $x-z$ 平面での最大値を示している。平均濃度を対象として調べられている従来の研究に対しては、その平均値の2倍を最大値として図中に比較した。

図8には最大流速の減少過程を示す。図2の $x-z$ 平面での S 軸上の流速(分布の最大流速)の変化を記したものであるが次元の検討から予想される x の $-1/3$ 乗にほぼ比例して減少している。

一様流中の密度噴流の挙動については、Panの実験結果²⁾をも考察した首藤の解析³⁾をはじめ、これまでに多くの検討⁴⁻⁹⁾がなされていて、初期運動量の影響が無視できるような状況(density predominant far field)では、プリュームの軌跡が次式の右辺第一項のみで近似できる場合が多い⁶⁾。

$$z/l_p = \left(\frac{3}{4} \frac{1}{\beta^2} \right)^{1/3} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{x}{l_p} \right)^2 + \left(\frac{1}{l_p} \right)^2 \left(\frac{x}{l_p} \right) \right\}^{1/3} \quad \beta: \text{定数} \quad (7)$$

本報でえられた実験結果も、これらの研究成果の結果と類似の傾向を示している。分布の広がりや、濃度、流速の減少に関しても同様なことがいえる。したがって、本報で行った実験の範囲では、流速、粒子濃度の軌跡にずれが生じることと、濁度の広がりの方が運動量の広がり比べてやや大きくなることを除けば、粒子を懸濁したプリュームにおける F_{dc} の影響については従来の実測結果と比べて大きな差はないといえる。

なお、沈降のパラメータ $\bar{w}_0$ の影響について考察するためにはデータ不足で、今後さらに広い範囲の $\bar{w}_0$ の値に対して実験を行う必要がある。

3. 理論解析

3. 1 基礎式

流速 U 及び粒子濃度 c について以下のような分布形を仮定する(図2参照)

$$u/U_\infty = \left(\Delta U_m e^{-r^2/b^2} + U_\infty \cos \theta \right) / U_\infty \quad (8) \quad c/c_0 = \left(c_m / c_0 \right) e^{-r^2/(\lambda b)^2}, \quad \lambda = a/b = 1 \quad (9)$$

これらの式を、現象の基礎式である粒子及び流体の保存則と運動方程式に代入して、プリューム軸に垂直な断面で積分することにより、以下の式が得られる¹⁰⁾。

$$\frac{d}{d\bar{s}} \left(\frac{\bar{v}_* \bar{b}^2}{2} \right) = E_0 \bar{b} \bar{u}_* \quad (10)$$

$$\frac{d}{d\bar{s}} \left(\frac{\bar{v}_*^2 \bar{b}^2}{4} \right) = F_{dc} \frac{(\lambda \bar{b})^2}{2} \bar{c}_m \sin \theta + \gamma E_0 \bar{b} \bar{u}_* \cos \theta \quad (11)$$

$$\frac{d}{d\bar{s}} \int_A \bar{u} \bar{c} d\bar{A} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{d\theta}{d\bar{s}} = \frac{\frac{1}{2} (\lambda \bar{b})^2 F_{dc}^{-2} \bar{c}_m \cos \theta - \gamma E_0 \bar{b} \bar{u}_* \sin \theta - c_d \sqrt{2b} \sin^2 \theta}{\frac{1}{4} (b^2 \bar{u}_*^2 - E_0 \bar{b}^2 \bar{u}_*^2)} \quad (13)$$

$$\tan \theta' = \frac{u \sin \theta + w_0}{u \cos \theta} = \tan \theta + w_0 / u \cos \theta \quad (14)$$

$$\text{ここで} \quad \bar{v}_* = \Delta \bar{U}_m + 2 \cos \theta \quad (15)$$

$$\bar{u}_* = \sqrt{(U_m - U_\infty \cos \theta)^2 + (U_\infty \sin \theta)^2} \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} &= u / U_\infty, \quad \bar{r} = r / l_p, \quad \bar{b} = b / l_p, \quad \bar{s} = s / l_p, \\ \bar{u}_* &= u_* / U_\infty, \quad \bar{A} = A / l_p^2, \quad \bar{c} = c / c_0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

A はプリュームの断面積、 E_0 はエントレインメント係数である。上の表現で $w_0 = 0$ とすると、これらの式は類似の現象の解析に関して従来発表されているものと本質的に同じものになる^{11, 12, 13)}。なお、この種の

現象は流れが進むと断面内に渦対が発生し、現象が非常に複雑になる。単なるエントレインメントの概念では現象が十分に把握できないところもあり、またエントレインメントについても密度勾配の影響など検討すべき要因も多い^{11, 14, 15)}。本報告では前述のように現象の取り扱いを単純化したために、これを補う目的で(11)式に新たにパラメータ γ を加えた。 γ は、(10)、(11)式からわかるように、エントレインメント係数の値を運動量に関する項でさらに補正することを意味している。この点は従来の類似の解析と異なる点で、 γ の値が増すととくに流速の減少に影響が大きい¹⁰⁾。数値解はこれらの基礎式を連立させて求めた。このとき $E_0=0.23$ 、 $\gamma=0.95$ 、 $C_d=0.2$ とした。

3. 2 計算結果と考察

実験No. 8の場合を例として、計算値を実験値と比較する。

図9はブリュームの軌跡を示す。粒子濃度の最大値の軌跡は流速のそれよりやや下側にある。しかし、その差はあまり大きくならない。これは、粒子の存在による見かけの密度の増加がブリュームの駆動力であるため、流体の運動が粒子の沈降により下方に引きずられるためと考えられる。

流速及び濃度の減少していく過程が図10に示されている。またブリュームの広がり様子が図11に記されている。実験の精度、解析の前提とした仮定などを考慮すると、これらの図に示されている計算値は実験結果を比較的良好に再現しているといえる。このことは、本報告で対象としたような相対的に沈降の影響が少なく、かつ噴出口からあまり遠くない地点までの状況は上記のようなモデルでも現象の解析が可能であることを示している。一方、以上の結果は基礎式を断面積分して、ブリュームの流下方向の断面の特性のみを調べている点に注意すべきである。現象のより詳細な表現のためには渦対の状況などを考慮^{16, 17, 18)}したり、あるいは基礎式を直接数値計算するなどの手法を検討すべきであろう。

4. あとがき

一様流中に鉛直下方に連続投入された沈降性粒子を含む密度噴流について検討した。噴出運動量の影響が少なく、かつ粒子の沈降速度も一様流速に比べて小さい場合（

$\bar{w}_0 < 0.6$, $0.02 < F_{d0} < 0.24$ ）について実測を行い、従来の（ $\bar{w}_0 = 0$ ）の研究結果と比較して、次のような知見が得られた。（1）粒子濃度の最大値の位置は流速のそれよりやや下側にある。（2）しかし、両者の差はあまり拡大しない。これは粒子の存在が流体の運動を促進させているためである。（3）ブリュームの軌跡や広がり幅に関しては、沈降性がない物質の測定結果とほぼ同様の傾向が得られた。したがって、（4）濃度や流速に相似分布形を仮定し、（粒子沈降を考慮した）基礎方程式を断面積分する従来の手法でも現象の概略は記述できた。 終りに本研究に協力された九州工業大学4年次生の下田憲治君に感謝する。

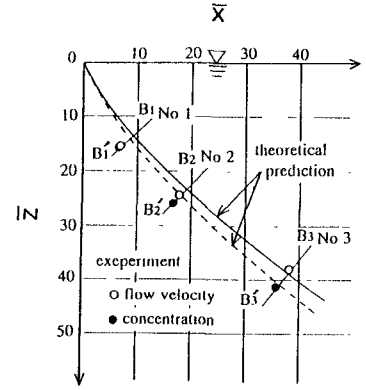


図9 放出水及び粒子の経路

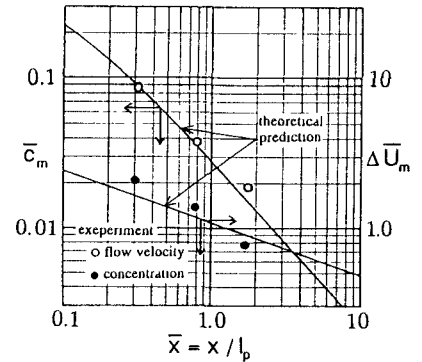


図10 軸上濃度及び流速の減少

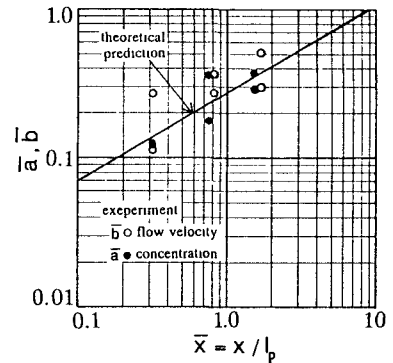


図11 ブリュームの広がり幅

5. 参考文献

- (1) 福岡捷二、吉川勝秀、佐藤郁太郎: 静水中に流入する固・液混相の水平噴流について、第21回水理講演会論文集、pp.75-80, 1976
- (2) Fan, L.N.: Turbulent buoyant jets into stratified or flowing ambient fluids, W.M. Keck Lab. Rept. No. KH-R-15, Calif. Inst. Tech. 1967
- (3) 首藤伸夫: 流水中での重力拡散、第17回海岸工学講演会論文集、pp.349-354, 1970
- (4) Slawson P.R. and Csanady G.T.: On the mean path of bent-over chimney plumes, J. Fluid Mech., Vol. 28, part 2, pp. 311-322, 1967
- (5) Chu, V.H. and Goldberg, M.B.: Buoyant forced-plumes in cross flow, Proc. ASCE, Journal of Hydraulics Division, Vol. 100, No. Hy9, pp. 1203-1214, 1974
- (6) Wright, S.J.: Mean behavior of buoyant jets in a crossflow, Proc. ASCE, Journal of Hydraulics Division, Vol. 103, No. HY5, pp. 499-513, 1977
- (7) Wright, S.J.: Buoyant jets in density-stratified cross flow, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 5, pp. 643-656, 1984
- (8) 水島雅文、片野尚明、曾我雅海、和田明: 流水中に放出される鉛直重力噴流の拡散過程、第33回海岸工学講演会論文集、pp. 581-585, 1986
- (9) Lee, J.H.W and Neville-Jones R.: Initial dilution of horizontal jet in cross flow, Journal of hydraulic Engineering, Vol. 113, No. 5, pp. 615-629, 1987
- (10) Fujisaki, K., Kawano, N. and Awaya, Y.: mean behavior of sediment-laden plume in cross flow, Proceedings of the Fourth International Offshore and polar Engineering Conference, pp. 249-254, 1994
- (11) Hirst, E.: Buoyant jets with three-dimensional trajectories, Proc. ASCE, Journal of Hydraulics Division, Vol. 98, No. HY11, pp. 1999-2014, 1972
- (12) Schatzmann, M.: The integral equations for round buoyant jets in stratified flows, Journal of Applied Mathematics and Physics, Vol. 29, pp. 609-630, 1978
- (13) Delvigne, G.A.L.: Round buoyant jet with three-dimensional trajectory in ambient flow, Pub. No. 228, Delft hydraulics Laboratory, 1980
- (14) List, E.J. and Imberger J.: Turbulent entrainment in buoyant jets and plumes, Proc. ASCE, Journal of Hydraulics Division, Vol. 99, No. HY9, pp. 1461-1474, 1973
- (15) Lee, J.H.W. and Cheung V.: Generalized Lagrangian model for buoyant jets in current, Journal of Environmental Engineering, Vol. 116, No. 6, pp. 1085-1107, 1990
- (16) Jirka, G.H. and Fong, H.L.M.: Vortex dynamics and bifurcation of buoyant jets in crossflow, Proc. ASCE, Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 107, No. EM3, pp. 479-499, 1981
- (17) 羽田野袈裟義、秋田伸治、斉藤隆、平野宗夫: 流れの中に放出された重力噴流の挙動について、水工学論文集、第34巻、pp. 205-210, 1990
- (18) Wood, I.R.: Asymptotic solutions and behavior of outfall plumes, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 119, No. 5, pp. 555-579, 1993