

2次元 plume の相互作用

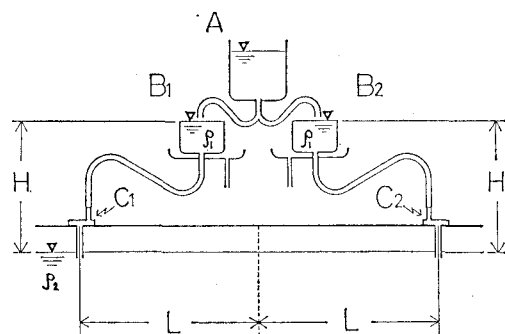
吉田次郎*・永田豊**

1. 緒言

Plume の振舞いは、沿岸域での温排水の深層排出等の問題に関連して数多く研究されてきているが、近年拡散効果をより高める為に、放水口を多数近接して設置する multi diffuser 方式が有効視されるに従い、新たに plume 又は jet が複数個存在する場合の相互作用についての基礎知識が必要となってきた。しかしこの様な問題を扱った研究は、定常状態における laminar な複数個の plume についての Pera & Gebhart¹⁾ や、定常状態における turbulent な jet についての中川ら²⁾ のものが挙げられる程度である。筆者ら³⁾ は第 26 回海講において、複数個の turbulent な plume の相互作用を調べる第 1 段階として、鉛直壁の近傍で放出された 2 次元 plume の振舞いを非定常状態も含め実験的に調べ報告した。これは 2 個の 2 次元 plume の対称面を壁で置き換えたものと考えられる事が出来る。それによると鉛直壁の近傍で放出された plume は、次第に壁の方に傾いて行くが、時間的に明確に区分しうる 4 つの stage を経て、準定常状態に達する。この場合第 3 番目の stage から plume の側面が壁面に交り、壁、水面、plume の側面で形作られる三角領域の水は他の水と隔離された形となる。しかし、この領域に次第に plume の水が取り込まれていき、準定常状態の第 4 番目の stage では、この部分全体はほぼ plume の水によって占められてしまう。この様な plume の形態の遷移は、周辺の乱流場によって影響される事が考えられる。従って対称面を壁で置き換えた場合、周辺の乱流場を変える可能性がある。今回の研究では、実際に 2 個の 2 次元 plume を同時に放出し、前回の対称面を鉛直壁で置き換えた場合の結果と比較した。その結果、準定常状態の第 4 stage において両者の間に、plume の傾きに有意の差が生じる事がわかった。

2. 実験方法

実験装置の概略を図一に示す。水槽は、長さ 200 cm、深さ 100 cm、幅 3 cm のアクリル製で、最初に密度 ρ_2



図一 実験装置

($=1.000\text{ g/cm}^3$) の真水を水槽に深さ 90 cm まで満たし、水槽内の流れが治まるまで暫くの間放置し、その後、slot C_1 , C_2 より食塩水を放出した。slot の開口部は、 $0.3\text{ cm} \times 3.0\text{ cm}$ の長方形である。食塩水は高所に位置する水溜め A に溜め、中間に位置する水溜め B_1 , B_2 で常にあふれさせる。 B_1 , B_2 の高さを調節する事により、2 つの slot から供給される水量を互に等しくし、又、個々の実験中に圧力水頭差 H が時間的にほぼ一定に保たれる様にした。今回の実験では、供給される食塩水の flow rate は $1.32\text{ cm}^2/\text{sec}$ から $2.25\text{ cm}^2/\text{sec}$ まで変化させた。flow rate は水面の上昇から算出した。系を支配するこの他の変数は、食塩水の密度 ρ_1 と両 slot と対称面の間の距離 L の 2 つである。今回の実験では、食塩水と真水の密度差 $\Delta\rho_0 = \rho_1 - \rho_2$ は、 0.015 g/cm^3 , 0.027 g/cm^3 , 0.033 g/cm^3 , 0.040 g/cm^3 の 4 種類の場合について行い、両 slot と対称面の距離 L は、対称面を壁で置き換えた効果を調べる為、対称面に鉛直壁を置いた実験の場合と同様に 5 cm から 20 cm まで 5 cm 毎に変化させた。食塩水は染料で着色し、その振舞いは 5 秒毎に写真に撮り、それぞれの plume の中心軸の傾きを写真から読み取った。

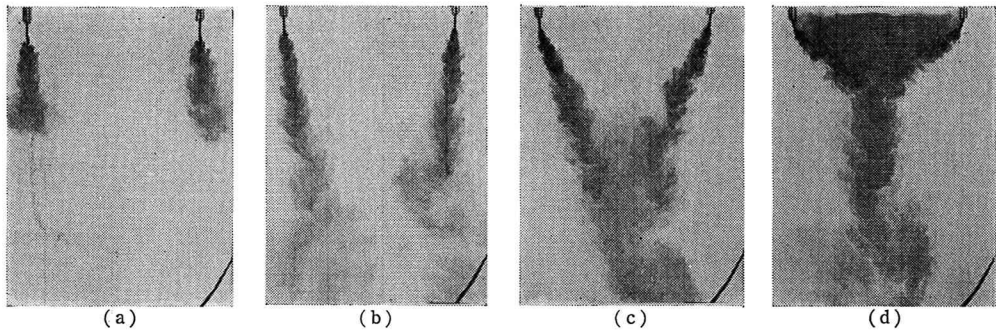
3. 結果と考察

3.1 同時に放出された 2 つの plume の発達

2 つの 2 次元 plume を同時に放出したときの時間変化を、 $L=15\text{ cm}$, $\Delta\rho_0=0.015\text{ g/cm}^3$, $2b_0u_0=2.18\text{ cm}^2/\text{sec}$, (ここで b_0 は slot 開口部の半値幅, u_0 は slot 開口部

* 学生会員 理修 東京大学大学院 理学系研究科

** 正会員 理博 東京大学教授 理学部地球物理学科



写真—1 2 つ同時に放出された plume の時間変化

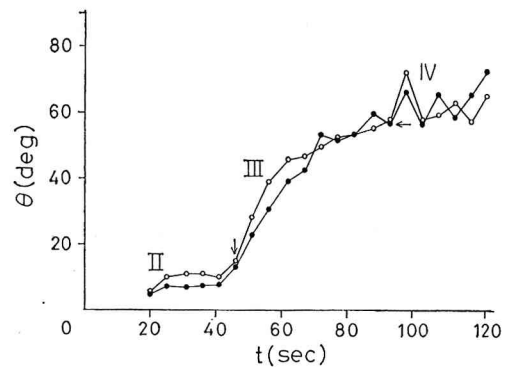
- (a) 放出後 5 秒 (stage I)
 (b) 放出後 20 秒 (stage II)
 (c) 放出後 35 秒 (stage III)
 (d) 放出後 102 秒 (stage IV)

での食塩水の速度) の場合について、写真—1 の (a) ~ (d) に示す。食塩水の供給を開始した直後の段階に於ては、写真—1 (a) に示す様に、最初それぞれが下部に円形の front (cap) を持つ独立した starting plume として鉛直方向に発達して行く (stage I)。その後 plume の cap 部の端が互いに接する頃から互いの方にゆっくりと傾き始める (stage II)。Cap 背後の定常 plume 部の側面が互いに接する頃から傾きの角度が急激に変化する (stage III)。この 2 つの段階に於ける plume の典型的な状態を、写真—1 (b) (stage II)、写真—1 (c) (stage III) に示す。Stage II から stage III への遷移は非常にはっきりとしており、容易に目視で確認できる。又 stage III に於ては、2 つの plume の側面と水面とで作られる三角領域内の水は、他の部分と隔離された形となる。この段階で 2 つの plume は三角領域から盛んに水を取り込んでおり、領域下部から若干 plume の着色水が取り込まれるものの、これが stage III に於ける plume の傾きの急激な変化の原因と思われる。しかしその後 plume の傾きは最大に達し、又、三角領域は下方から取り込まれた plume の着色水で埋めつくされ、ほぼ定常状態となる (stage IV)。この段階における典型的な状態を写真—1 (d) に示す。

3.2 stage から stage への遷移時刻

それぞれの plume の中心軸の傾き θ の時間変化の例を $\Delta\rho_0=0.027 \text{ g/cm}^3$, $2b_0u_0=1.32 \text{ cm}^2/\text{sec}$, $L=20 \text{ cm}$ の場合について図—2 に示す。横軸は食塩水供給開始時からの時間である。○ は左側の slot C_1 より生じた plume の、● は右側の slot C_2 より生じた plume の傾きの測定値を示す。この様な図を各実験に対して描いて、前回の場合と同様に各 stage から各 stage への遷移時刻を決定した。但し stage I から stage II への遷移は、写真の撮影間隔が粗い為、目視で決定した。

前回筆者ら⁴⁾ はこれら遷移時刻を支配するパラメータを検討し、浮力 flux $Q=b_0u_0g\Delta\rho_0/\rho_1$ (但し g は重力



図—2 θ の時間変化 (垂直方向の矢印は stage II から stage III、水平方向の矢印は stage III から stage IV への遷移点を示す)

加速度) と slot の位置 L の 2 つの量によって作られる時間の次元を持った量、即ち

$$LQ^{-1/3}=L(b_0u_0g\Delta\rho_0/\rho_1)^{-1/3} \dots\dots\dots (1)$$

が支配的であることを示した。

図—3 に 2 つの plume の傾きを平均した傾きの時間変化の曲線から求めた stage から stage への各遷移時刻、 t_{I-II} (○), t_{II-III} (△), t_{III-IV} (□) を $LQ^{-1/3}$ に対して描いたものを示す。かなりのバラツキがあるものの各遷移時刻は鉛直壁の近傍の場合と同様に $LQ^{-1/3}$ に比例している。各遷移時刻の $LQ^{-1/3}$ に対する比例関係を最小 2 乗法によって求めると

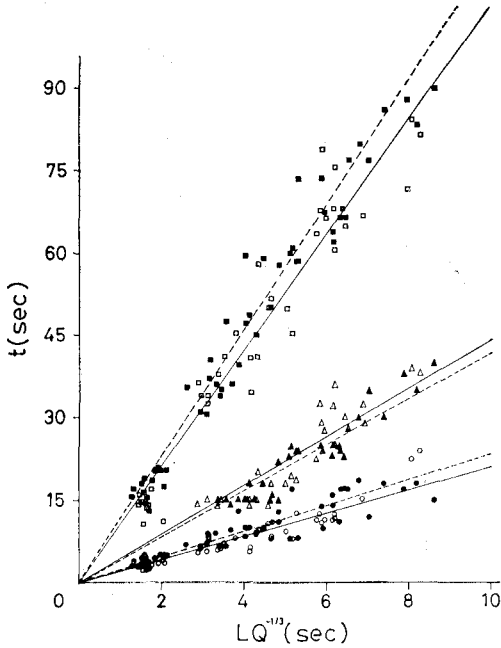
$$t_{I-II}=(2.12\pm0.15)LQ^{-1/3} \dots\dots\dots (2)$$

$$t_{II-III}=(4.46\pm0.53)LQ^{-1/3} \dots\dots\dots (3)$$

$$t_{III-IV}=(10.50\pm0.46)LQ^{-1/3} \dots\dots\dots (4)$$

となる。これらの直線を図では実線で示してある。比較の為に鉛直壁の近傍で plume を放出した場合の各遷移時刻 t_{I-II} (●), t_{II-III} (▲), t_{III-IV} (■) も併せて示す。 $LQ^{-1/3}$ に対する比例関係を同様に最小 2 乗法で求めると、

$$t_{I-II}=(2.33\pm0.20)LQ^{-1/3} \dots\dots\dots (5)$$

図-3 遷移時刻と $LQ^{-1/3}$ の関係

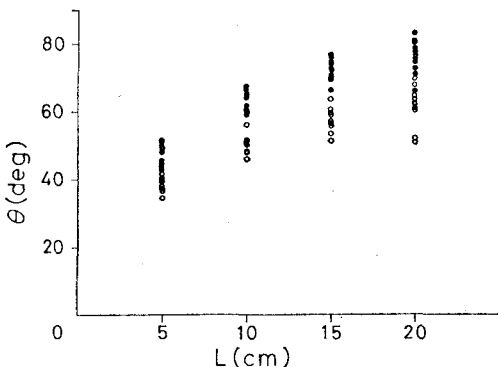
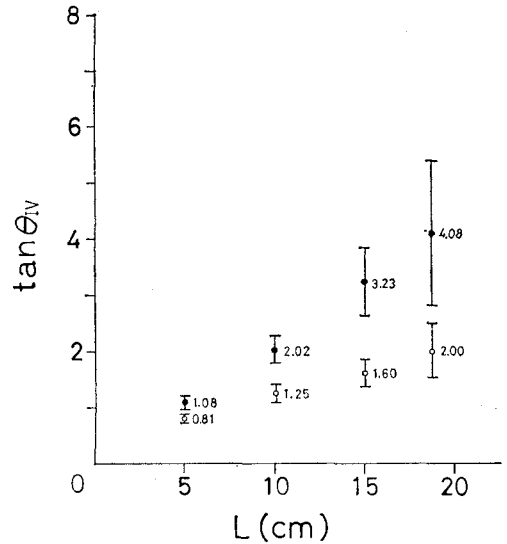
$$t_{II-III} = (4.19 \pm 0.35)LQ^{-1/3} \dots\dots\dots (6)$$

$$t_{III-IV} = (11.50 \pm 0.38)LQ^{-1/3} \dots\dots\dots (7)$$

となる。これらの直線を図では破線で示してある。 t_{III-IV} については2つの plume を放出した場合の方が若干早くなっているものの、 t_{I-II} 、 t_{II-III} は殆んど変化がなく、各遷移時刻については対称面を壁で置き換えても大きな影響はあらわれない。

3.3 準定常状態 (stage IV) に於ける plume の傾き

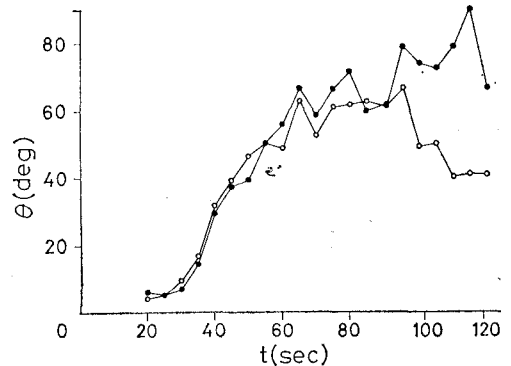
壁近くで plume を放出した場合に、準定常状態に達した stage IV に於ける plume の傾き θ_{IV} は、plume の放出口の壁からの距離 L と共に増大し、両者の間には、 $\tan \theta_{IV} \propto L$ の関係がある事が示されている⁵⁾。2つの plume を放出した場合の θ_{IV} と L (この場合は放出口から対称面までの距離) の関係を、横軸に L をとり、縦軸に θ_{IV} および $\tan \theta_{IV}$ をとったものをそれぞれ図-4、図-5 に示す。○で示したものが2つの plume

図-4 θ_{IV} と L の関係図-5 $\tan \theta_{IV}$ と L の関係

を放出した場合で、●で示したものが前回に報告した対称面を壁で置き換えた場合のものである。実際に2つの plume を放出した場合にも、 θ_{IV} は $\tan \theta_{IV}$ が L に比例する形で L の増大と共に大きくなる事が示される。しかし両者の間で θ_{IV} の絶対値、或いは比例係数に有意の差が認められ、実際に2つの plume を放出した場合の方が plume の傾きがずっと小さい。

前回の報告⁵⁾に於て、筆者らは plume の側面と鉛直壁と水面によって作られる三角領域に生じる水の循環が、準定常状態を維持する機構に重要な働きをすると仮定して $\tan \theta_{IV}$ と L との関係を検討した。しかし、実際に2つの plume を放出した場合、2つの plume の側面と水面で作られる領域に、明確な軸対称の水の循環は、鉛直壁の近傍で1つの plume を放出した場合の循環ほど明確には認められなかった。

これに関連して興味深いことは、準定常状態における stage IV の対称性が、或る程度の時間を経過した後大きく崩れる場合があることである。図-6 にその様な場

図-6 準定常状態 (stage IV) で対称性が崩れた場合の θ の時間変化

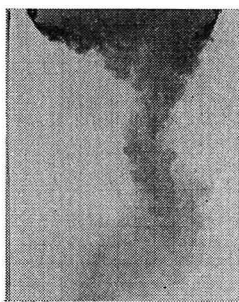


写真-2 準定常状態 (stage IV)
で非対称性が生じた場
合、放出後 120 秒

合の2つの plume の傾き θ の時間変化の例を示す。 $4\rho_0 = 0.027 \text{ g/cm}^3$, $2b_0u_0 = 1.85 \text{ cm}^2/\text{sec}$, $L = 20 \text{ cm}$ の場合である。又、この様な非対称を生じた場合の一例を写真-2 に示す。2つの plume ないし jet が同時に放出された場合の非対称性については、一方の plume ないしは jet の強さが、他方に比して著しく弱い場合には、弱い方の plume ないしは jet がより大きく傾く事が、Pera & Gebhart⁷⁾, 中川ら⁸⁾によって報告されている。しかし我々の場合には、2つの plume の強さはほぼ等しく、準定常状態に達するまで対称性は保たれており、これらの場合とはかなり違った機構が働いている様に思われる。我々の場合、この様な非対称が生じるのは、比較的 L の大きな場合に限られており、2つの plume の側面と水面で区切られた領域の循環に何らかの不安定が生じる為ではないかと考えている。実際に2つの plume を放出した場合に plume の傾きが減少する問題と関連し、今後更に三角領域内での水の循環について研究を進めたい。

4. 結 論

2つの2次元 plume を同時に放出しその振舞いを実験的に調べた。plume の発達時間経過は以下の4つの段階を辿り、その変化の様子は鉛直壁の近傍で1つの2次元 plume を放出した場合、すなわち、対称面を鉛直壁で置き換えた場合とまったく同じであるということがわかった。

(stage I) 2つの plume は近傍に壁又は他の plume が存在しない場合の一般の starting plume と同様に振舞う。傾きの角度は 0 である。

(stage II) 2つの plume の cap 外縁部が互いに接触した時から plume は互いの方向に傾き始めるが、この段階での傾きの角度の変化率は小さい。

(stage III) 2つの plume の cap 背後の定常 plume 部の側面が互いに交差し始めた時から傾きの角度の変化率は大きくなる。この stage の後半では2つの plume の側面と水面とで作られる三角領域内の水は、三角領域下部から盛んに水の供給を受け、傾きの角度の変化率はやや減少する。

(stage IV) 2つの plume の傾きの角度は、多少のふらつきはあるものの、ほぼ一定になる。

実際に2つの plume を放出した場合の stage から stage への遷移時刻 t_{I-II} , t_{II-III} , t_{III-IV} と鉛直壁の近傍で plume を放出した時の遷移時刻との間には、 t_{III-IV} が若干早くなっているもののほとんど差はみられなかった。stage I から stage IV までの間については、2つの plume の流量を等しく保つ事によって、容易に対称性の良い実験が可能であった。

しかし、準定常状態である stage IV における振舞いについては、実際に2つの plume を放出する場合と、対称面を鉛直壁で置き換えた場合の間に著しい差が認められ、2つの plume の場合の plume の軸の傾きはかなり小さくなる。この差違の生じる原因については、現在の所明確ではないが、2つの plume の側面と水面とで囲まれる領域内の循環特性に若干の差がある為と思われる。特に L の大きな時、準定常状態 (stage IV) において、或る程度の時間の経過後著しい非対称性が生じる事があるなど、この領域での循環に何らかの不安定が生じうる様に思われる。今後この領域での水の循環特性とその安定性について、plume とその周辺の乱れの場の構造の究明を通して研究していく予定である。

最後に本研究は文部省環境科学特別研究による研究の一部であることを付記し、謝意を表する。また研究遂行にあたり、種々の御助言をたまわった東大地震研相田勇助教授に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Pera, L. and B. Gebhart: Laminar plume interaction, J. Fluid Mech., Vol. 68, pp. 259~271, 1975.
- 2) 中川博次・彌津家久・神田幹夫: 噴流干渉時の乱流構造に関する実験的研究——双対噴流構造——, 京大防災研究所年報, 第22号 B-2, pp. 415~451, 1979.
- 3) 吉田次郎・永田 豊: 鉛直壁の近くで放出された plume の振舞い, 第26回海講論文集, pp. 577~581, 1979.
- 4) 前出 3).
- 5) 前出 3).
- 6) 前出 3).
- 7) 前出 1).
- 8) 前出 2).