

可視化を用いた Forced Plume の大規模渦に関する実験的研究

Experimental Study on Large Eddies in Forced Plume by Flow Visualization

金子哲也*

By Tetsuya KANEKO

Experiments are carried out to obtain the instantaneous spacial features of a plane forced plume by utilizing a quantitative visualization technique. New information is revealed concerning the motion of the large eddies in the flow. It is proved that a large eddy is an isolated region containing highly condensed vorticity. An account is given of the effect of a large eddy on entrainment and the effect on flapping. In addition, circulation of the eddies, acquired directly from the experiments, is shown to be smaller than estimated in previous models.

Keywords: Forced Plume, Large Eddy, Circulation, Entrainment, Visualization

1. はじめに

Forced Plume と呼ばれる流れは、自由乱流の典型の一つであり、工学の場においても頻繁に現れる流れであるため、過去、多くの実験や解析が行われてきた^{1)~3)}。これらの研究によって、近年、Forced Plume の流れの中に、大規模渦と呼ばれる組織的な構造が存在することが確認され、この大規模渦が周囲流体の連行に大きく関与していることが示唆されている。現在、この大規模渦が連行に際してどのような役割を果たしているのかを、力学的に説明することに大きな関心が寄せられており、既にいくつかの試みがなされ始めている¹⁾⁴⁾。このように大規模渦に着目して連行を考える場合には、1) 単一の大規模渦による巻き込み、2) ななめに向かい合う逆向きの循環を有する渦による巻き込み、3) 流下方向に隣合う同じ向きの循環を有する渦による干渉(合体等)、4) 大規模渦とそれ以外の流れとの相互干渉、などのモードが考えられるであろう。特に3) に関しては、2つの渦が合体する時に大きな連行が起こるという報告がなされているが、現時点では、合体などの流れの激しい変化をともしう現象に対しては、その複雑さ故に現象論的にも不明な点が多い。従来の研究では、このような合体等の現象にはとらずに深く立ち入らずに、上記1),2),4) のモードによる連行を対象にモデル化が行われてきた。モデル化にあたっては、大規模渦による連行をつかさどるパラメータとして、渦の代表長さ(半径)、渦の循環、渦列の配置構造などが挙げられる。これらのパラメータは、実験結果にもとづき決定されている。しかし、従来の実験の多くは、染料による定性的可視化とホットフィルム流速計などによる点計測が主である。上記のパラメータのうち、渦の代表長さや配置構造などは、定性的な可視

*学生員 東京大学大学院工学系土木工学専攻
(〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

化実験からでも、そのおおよその値を把握できるであろう。しかし、渦の循環は流れ場の面的な定量情報であり、定性的可視化や点計測から直接その値を知ることは非常に困難である。そのため、従来のモデルにおいては、渦の循環を点計測から得られる情報と結び付ける努力がなされているが、依然として、渦の循環の取扱いが他の情報に比べて信頼性に乏しい結果となっていると思われる。

本研究では、渦の循環をはじめとする流れ場の面的な定量情報を得るための実験を行い、大規模渦に関してさらに情報を収集することを目的とした。実験には可視化手法を用いて流れ場の面的な定量情報を得る工夫をした。なお、対象とする流れ場は、2次元鉛直の Forced Plume である。

2. 実験方法

実験は、福岡・佐藤¹⁾に倣い、次のような装置で行われた。幅 150cm、奥行き 150cm、高さ 100cm のアクリル製水槽を用い、2次元性をもたせるために、合板製の仕切り板で水槽の前面 15cm を仕切った。仕切り板は両側端で開いており、仕切り板より後方の周囲流体が自由に通過できるようになっている。さらに水槽最下部は全奥行きにわたって箱型に延長されており、ここも仕切り板はないため、流下しきった Plume 流体がここにたまっていく。このようにして、連行による周囲流体の損失や、密度界面の上昇による計測領域の減少、水槽前面部における回転流の発生など実験に好ましくない影響を与えるものを取り除いた。上記水槽に、周囲流体として水道水を高さ 70cm まで満たした。放出流体には、食塩水を用い、鉛直下向きに放出した。放出流体を入れたヘッドタンクを水槽水面より高い位置に設置して初期運動量を持たせた。ヘッドタンクは、ポンプを用いオーバーフローさせ、常に一定水位を保たせた。放出口は、15cm × 0.2cm のスリットであり、スリット先端の角度は 45° である。ヘッドタンクと放出口の間にバルブを設け、実験開始時に不要な乱れが入らないようにした。実験装置と座標系を図-1 に示す。

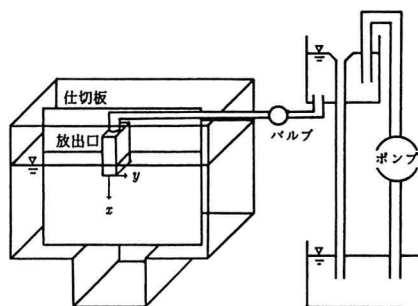


図-1 実験装置

本研究で着目しているものの1つである渦の循環は、瞬間の流れ場の面的な情報であり、点計測から直接求められるものではない。そこで本実験においては、可視化手法を用い流れ場を可視化した。可視化された流れ場を写真にとり、その後、写真から必要な定量的データを取得した。可視

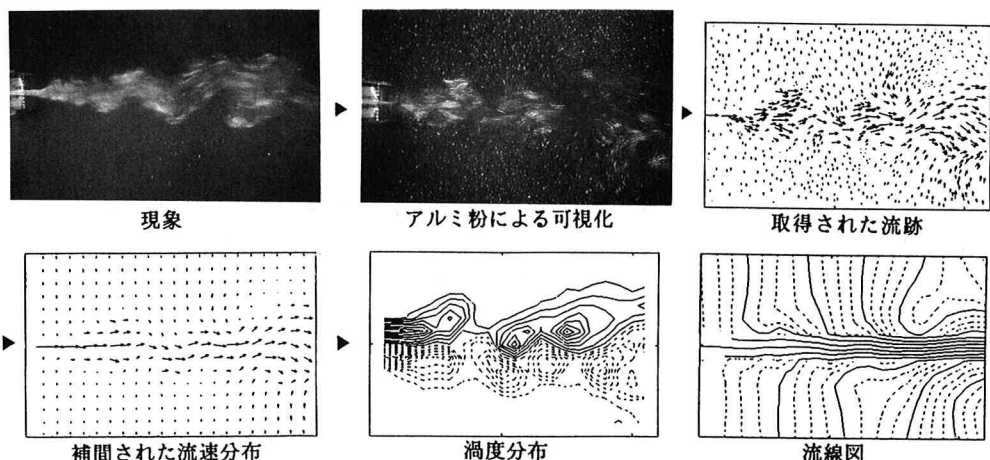


図-2 データ処理の流れ

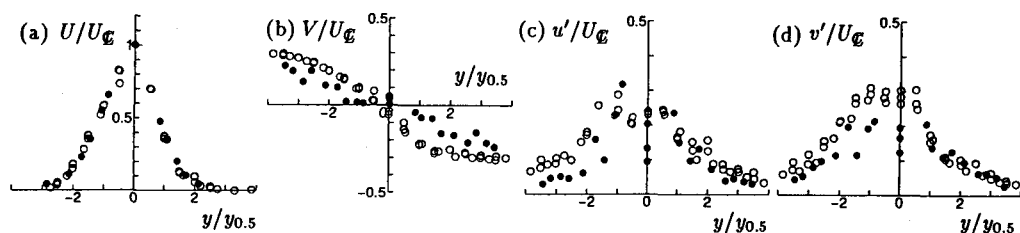


図-3 流れの平均特性ならびに乱れ特性 (●: $x = 5 \sim 7\text{cm}$, ○: $x = 15 \sim 17\text{cm}$)

化手法として、アルミ粉懸濁法を用いた⁵⁾。実験に先立ち、放出流体、周囲流体共に、アルミ粉を適量浮遊させた。周囲流体が充分静穏になったのを目視で確認した後、実験を開始した。実験室を暗室とし、流れ場を横からスリット光源で照射し、 z 方向 (奥行き方向) 中央断面を断面視した。用いたスリット光源は、ハロゲン球 1500W であり、スリット幅は約 2mm である。上記のようにして可視化された流れ場を、水槽正面より写真にとった。モータードライブを用い、1 秒毎の連続写真をとった。このようにして撮影された写真には、アルミ粉の流跡が多数写っている。原理的には、流跡の長さを露光時間で割れば、地点毎の流速ベクトルが得られる。ただし、アルミ粉はその形状が鱗片状をしているため、流れている途中で向きを変えたとき反射光が消えてしまい、このような計測には向かないとされている⁵⁾。本実験では、スリット光源の反対側に反射鏡を設置し、両側から照射することによって、アルミ粉の方向性の影響を小さくするよう努めた。また、現像された写真においては、流跡が徐々に消えているものと端点のはっきりしているものとを識別は比較的容易であったので、次に述べるデータ取得の過程で、端点のはっきり撮影されているもののみをデータとして採用した。

上記の手法により、可視化され、写真に収められた流れ場の情報を以下に述べる手順でデータとして取得し、解析した。現像された写真から、デジタイザーを用いて、アルミ粉の流跡を一つずつデジタルデータに変換してパソコンで取扱えるようにした。取得した流跡の数は、写真 1 枚当り 800 ~ 1000 個である。得られた流跡データを格子点上に補間し、その瞬間の流速分布 (u, v) を求めた。補間方法は、元の流跡のうち注目している格子点の近傍にあるもののみを距離の逆数で重み付き平均した。そして、この格子点上の流速分布 (u, v) をもとに、渦度分布 ω 、流れ関数 ψ を求めた。上記のデータ処理の流れを図-2 に示す。

本実験装置に固有のくせがなく、データを得るための可視化手法が妥当性を有することを確認するために、本実験装置・手法を用いて得られた流れの平均特性ならびに乱れ特性を、従来の実験³⁾と同じ形に整理した。図-3(a) に流下方向の平均流速 U 、(b) に横断方向の平均流速 V 、(c) に流下方向流速の乱れ強度 u' 、(d) に横断方向流速の乱れ強度 v' の横断分布を示す。ここで、平均流速は、連続撮影された 24 枚の写真に対する流速分布を、格子点毎に平均することにより求めた。乱れ強度は、この平均流速からのそれぞれの時刻の変動の r.m.s. 値である。それぞれの値は、従来と同様に、縦軸は軸上平均流速 U_0 で、横軸は流下方向流速の半値半幅 $y_{0.5}$ で規格化した。図-3(a)~(d) より、本実験で用いられた実験装置ならびに可視化手法によるデータ取得は、定性的にも定量的にも一応満足のいくものといえる。

3. 実験結果と考察

$Fr_0 = 7.7$, $Re_0 = 86$ の条件のもとに行われた実験について結果を示し考察を加える。ここで、 Fr_0 , Re_0 は放出口での水理諸量と放出口幅を用いた密度フルード数、レイノルズ数である。

図-4,5,6 は、連続する 3 秒間の (a) 流速分布 (u, v) と (b) 渦度分布 ω の等値線を示したものである。図には、 $x = 5 \sim 21\text{cm}$, $y = -6 \sim 6\text{cm}$ の領域を示す。なお、図の左側の放出口側を上流側、右側を下流側と呼ぶことにする。図 (b) において、等値線の間隔は 0.2/sec であり、実線は正 (反時計回り)、破線は負 (時計回り)

の渦度を表している。図(a)において、中心軸をはさんで左右非対称に、従来の可視化観測から言われている大規模渦運動が認められる(図中A,B)。各々の渦領域は、対応する図(b)上でも、渦度が集中している領域を形成しており、従来の可視化観測から言われている大規模渦が、大きな渦度をもつ孤立した領域であることがあらためて確認される。これは、当然のことのように感じられるかもしれないが、注意を要する点である。なぜなら、従来の定性的可視化においては染料の集中した領域を大規模渦と呼ぶことが多いが、染料が集中している領域と渦度が集中している領域とは、必ずしも一致するとは限らないからである(渦度を持たない染料塊は、しばしば「渦のぬけがら」などと呼ばれる)⁶⁾。しかし本実験では、流れ場の面的な渦度分

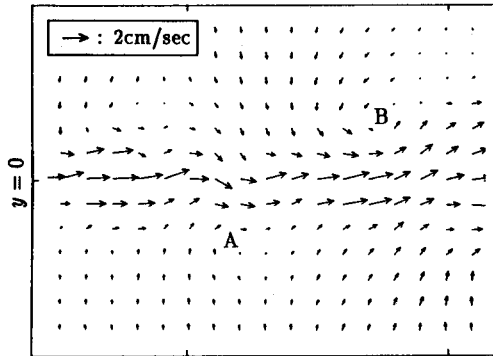


図-4(a) $t = T - 1$ における流速分布

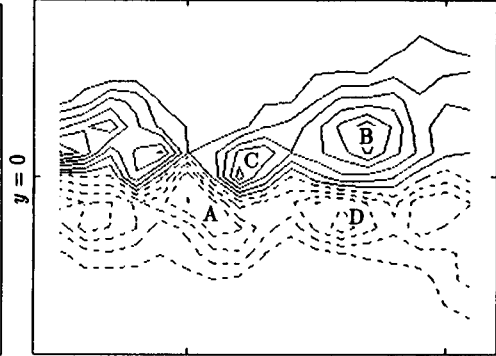


図-4(b) $t = T - 1$ における渦度分布

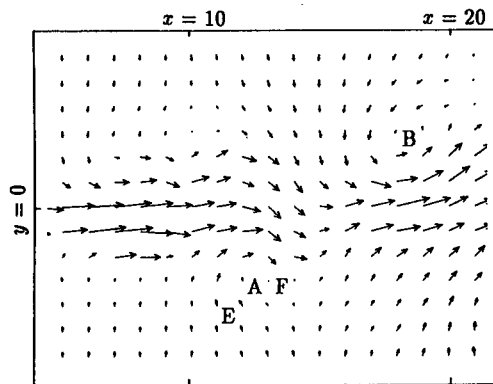


図-5(a) $t = T$ における流速分布

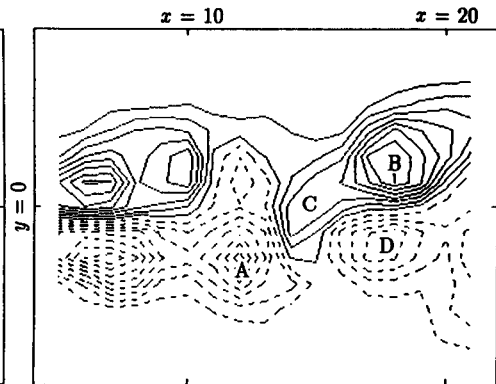


図-5(b) $t = T$ における渦度分布

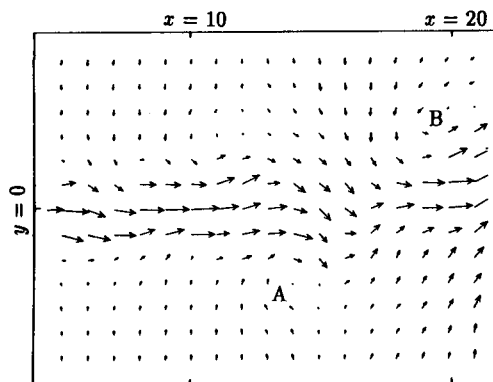


図-6(a) $t = T + 1$ における流速分布

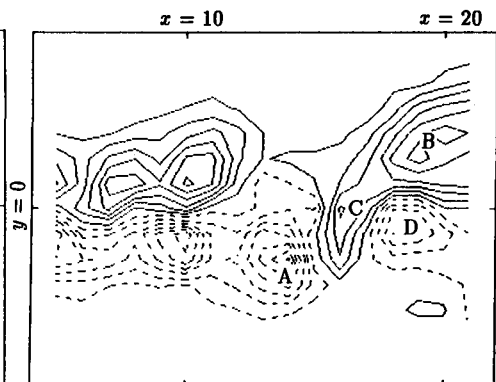


図-6(b) $t = T + 1$ における渦度分布

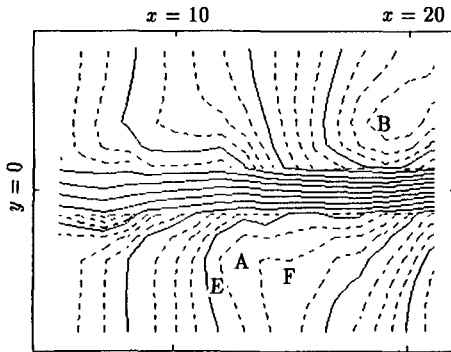


図-7 $t = T$ における流線図

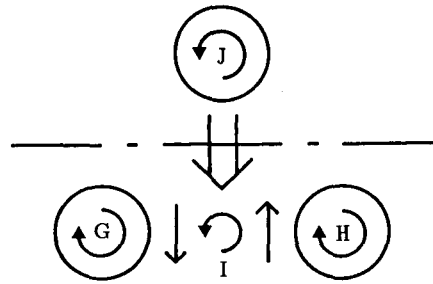


図-8 概念図

布を知ることが可能であるため、十分な信頼性を持って、この構造を孤立した「渦」と呼ぶことができる。そして、これらの渦は、その個性を保ちながら、下流へと移流している。また、図(b)においては、そのほかにも渦度が集中している領域がみられる(図中C,D)。しかし、これらの渦領域は渦A,Bなどと比較して渦が弱いので、図(a)流速分布図上では、明瞭な渦運動とは認められないものとなっている。

図-5 と同時刻における流線図を図-7 に示す。図-7 においては実線の間隔は $2\text{cm}^2/\text{sec}$ 、破線の間隔は $0.5\text{cm}^2/\text{sec}$ である。なお、見やすさを考慮して、中心軸付近 ($|y| < 1$) では、破線は省略されている。また、中心軸付近 ($|y| < 1$) では流れ関数の大きな変化に対して格子間隔が広いためあまり良い表現とはなっていないが、その他の領域 ($|y| \geq 1$) では、連行の様子をよく表しているといえる。同図と図-5(b)を照らし合わせることで、周囲流体は大規模渦の上流側で強く連行されていることがわかる。側方からの流線は、大規模渦の上流側へ1度戻るように回り込んでいる(図中E)。流速の流下方向成分 u は、ここで一旦負の値を示している。そして、大規模渦の高渦度領域にとらえられ、その後、Plume 領域内へと強く巻き込まれていく。また、大規模渦の下流側では流速がほとんど0となっている(図中F)。この領域は、図-7の流線図においては、流線間隔が著しく広がっており、特徴的な領域となっている。しかし、室田ら⁴⁾が言うような流線の特異点(鞍点)は、本実験では認められなかった。この領域より下流側の流線は、さらに下流側の渦によりPlume内へと連行されており、ゆるやかな曲線を描いている。

このように、大規模渦による連行は、1つの大規模渦近傍の比較的せまい領域内で閉じた運動形態を示しており、前書きで述べたモード1)の単一の渦による巻き込みがモード2),4)に比べて支配的であると思われる。このような傾向は、従来の可視化観測からも認められていたところであるが、モデル化には意外に直接組み入れられておらず、今後、単一の渦による連行のモデル化が検討されてよいように思われる。

また、図-4(b)~6(b)における渦Cは非常に興味深い挙動を示している。渦Cは、流下にともない、中心軸 ($y = 0$) を大幅に越えて流れの反対側の領域に入り込んでいる。これは、対応する図(a)流速分布図との比較より、流軸の「ゆらぎ」と密接に関係していることが示唆される。つまり、渦塊が流れの反対側の領域に入り込むとき、大きな「ゆらぎ」が観察される。また、渦がこのような挙動を示す理由としては、次のように考えられる。図-8に示す渦Gと渦Hは、同じ向きの循環を有しているとする。すると渦Gと渦Hの間の領域I付近は、図のような流速分布を持つであろう。渦を速度の変化点での「ころ」として捉えたと、領域Iは渦G,Hとは反対向きの循環が要求される領域であると考えられる。この要求を満たすために、流れの反対側の領域に存在する逆向きの渦Jが領域Iに引きつけられるという説明が成り立つと思われる。このように考えると、2列非対称に並んだ大規模渦は、互いに反対側の領域の大規模渦の中間付近に引き付けられることになる。これが、流れに特徴的な流軸の「ゆらぎ」を生み出していると考えられる。

最後に、大規模渦の循環 Γ の絶対値を図-9に示す。横軸は、流下距離 x である。大規模渦の循環は、循環の定義 $\Gamma = \int_S \omega dS$ に従い、図4(b)などにおける渦度分布を、渦としての個性を保っていると思われる適当な領域で面積分することにより求めた。同図より、大規模渦の循環は大きなばらつきを有するものであることがわかる。本実験で採用された測定法の精度にも多少問題はあるものの、むしろこれは、大規模渦と呼ばれる乱流運動にとって当然のことであろう。図4.5,6(b)における渦中心の渦度の最大

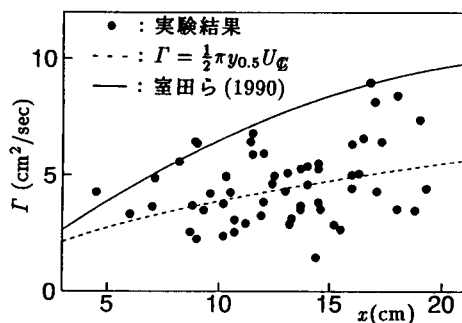


図-9 大規模渦の循環

値が $U_g/y_{0.5}$ 、渦半径が $y_{0.5}$ 程度であることを考慮して、循環は $\frac{1}{2}\pi y_{0.5} U_g$ のオーダーであるといえる。また、図には室田ら⁴⁾のモデルにおける循環の推定式も合わせて示す。これは、最大値を包絡するようなやや大きめの見積りとなっている。Forced Plume の大規模渦の循環については、浮力効果により流下にもとない大きくなるという理論解析もあり⁷⁾、今後さらに詳細な検討が必要である。

4. まとめ

本研究で得られた主要な結果を挙げてまとめる。

- 流れ場の面的な定量情報を得ることのできる実験を行い、従来の可視化において観測されてきた大規模渦が、渦度の集中した領域であることがあらためて確認された。
- 大規模渦による周囲流体の連行は、1つの渦の近傍の比較的せまい領域で閉じた運動形態を示しており、単一の渦による巻き込みが卓越していると考えられる。
- 渦が流れの中心軸を越えて反対側の領域に入り込むとき、流軸の大きな「ゆらぎ」が観察されることが明らかとなった。
- 大規模渦の循環は、大きなばらつきを有するが、ほぼ $\frac{1}{2}\pi y_{0.5} U_g$ のオーダーであることがわかった。

本研究を進めるにあたり、東京久永(株)中井正則氏、東京大学土木工学科河原能久助教授、同学科土質研究室周郷啓一技官に貴重な助言を賜った。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 福岡捷二・佐藤郁太郎：二次元噴流中のオーガナイズド・モーションの構造とその水理学的役割，土木学会論文報告集，第277号，pp.71~83，1978。
- 2) 小松利光・浦勝・後藤俊一：2次元密度 Plume における組織渦の構造と連行現象，第28回水理講演会論文集，pp.311~319，1984。
- 3) 室田明・中辻啓二・玉井昌宏：二次元フォーストブルームの乱流構造に関する実験的研究，土木学会論文集，第405号/II-11，pp.79~87，1989。
- 4) 室田明・中辻啓二・玉井昌宏：二次元フォーストブルームの流動・乱流特性の渦列モデルによる解析，土木学会論文集，第417号/II-13，pp.83~90，1990。
- 5) 種田定俊：トレーサ法I(直接流入法)，浅沼強編「流れの可視化ハンドブック」，朝倉書店，p.198，1977。
- 6) 佐藤隆之・柿崎吉孝・高木隆司：流脈線写真から渦構造を特定できるか？，ながれ，第9巻第4号，pp.250~261，1990。
- 7) 中井正則：Plume において大規模渦まわりに発生する2次渦度が連行に果たす役割，水工学論文集，第35巻，pp.683~686，1991。