15 画像処理による突発噴流の内部構造の研究

長岡技科大 白樫正高 日立製作所 佐藤俊二[○]
トヤマ産機 中川 均 長岡技科大 小林史典

Analysis of the eddy structure in an unsteady turbulent jet
by image processing

By Masataka SHIRAKASHI*, Shunji SATO**, Hitoshi NAKAGAWA***,
and Fuminori KOBAYASHI*,

A jet was formed by issuing 0.9 wt% water solution of fluorescent dye impulsively with velocity $U_N=7.2$ cm/s from a round nozzle with a diameter $d=17.95$ mm into otherwise quiescent water. The cross section including the jet axis was visualized by scanning a laser beam. A sequence of photographs was taken with an interval of 0.25 s in a run from the start of the jet. The area of a photograph was divided into 256×256 meshes and their brightness were converted into digital values, from which the characteristics of turbulence in the jet were investigated quantitatively. The image processing developed in this work provides an effective method to analyse spacial structure of turbulence in unsteady flows.

1. 緒言 通常、乱れの空間的構造をとらえるため固定点における速度、濃度等の変動が測定されるが、ある瞬間の流れ場全体の様子を描き出すためには多くの測定探子と膨大な信号処理を必要とする。また、流れが平均的に非定常で空間的に一様でない場合はこの従来の方法は殆ど無力である。可視化された流れの画像はある瞬間の場全体の情報を含んでおり、これまで、固定点での変動信号を解析する際に有力な情報を与えてきたが、乱れの特性を定量的にとらえるために画像を直接用いた例は極めて少ない [1,2,3]。本研究では近年急速に発達したコンピュータおよび画像処理技術を適用して、典型的な非定常乱流の一つである静止流体中を成長する非定常噴流の乱れの構造を求める方法を検討した。

2. 実験装置および方法 直径 $d=17.95$ mm の円形ノズルからほぼ静止している水中に流速 $U_N=7.2$ cm/s で蛍光染料ローダミンR-F5G の0.9%水溶液を突発的に噴出させた（ノズルにおけるレイノルズ数=1140）。図1の装置でレーザービームを回転する正12角柱形の鏡に反射させ、噴流軸を含む面内を走査させた。可視化された噴流断面を噴射開始後0.25秒間隔で撮影し、得られた写真を図2のシステムにより数値化した。撮影条件を表1に示

* Technological University of Nagaoka, Kamitomioka-machi 1603-1, Nagaoka, 949-54 Japan.

** Hitachi, Kanda Surugadai 4-6, Chiyoda-ku, Tokyo, 101 Japan.

*** Toyama Sanki Co. Ltd., Nojiri 662, Fukuno-cho, Toyama Pref., Japan.

図 1 実験装置

図 2 画像処理システムの構成

表 1 撮影条件

カメラ	Nikon F3	絞 り	1.4
モータドライブ	Nikon MD4	シャッタースピード	1/15
レンズ	Nikkor 50mm	光 源	He-Ne レーザー
	F=1.4	(波 長)	632.8nm
フィルム	NEOPAN 400	(出 力)	5mW
	(8倍増感)	(ビーム径)	φ1.5

図 3 輝度の数値化

す。一枚の写真を 80×256 の画素（一辺 1.4 mm の正方形）に分割し各画素の輝度を 4 ビットの数値に変換した。図 3 (a) の写真をこのように変換するとき一回の入力の結果は (b) のように、量子化誤差およびノイズの影響による変動が大きいので、同じ写真の入力を 17 回加算して (c) のような輝度に対応する数値を得た。同一条件下で行った 10 回の噴射から得た写真を上の方法で処理し統計的平均を得た。上記の方法で得られた輝度に対応する数値は染料の濃度とともに増加するが、両者は比例しない。この点については染料、光源、撮影方法等の検討を続けているが、本報では第 1 近似としてこの数値がそのまま濃度を表すものとする。

3. 実験結果 噴流断面の連続写真の一例を図 4 に示す。この $t = 8 \text{ s}$ における写真を数値化して求めた噴流の輪郭および①、②断面の濃度分布を図 5 に示す。噴射開始後の時間 t が大きくなる ($t > 5 \text{ s}$) と噴流の外形は極めて複雑となり、図 5 の断面濃度分布から明かなように、ある瞬間において噴流内部にはかなり広い外部流体の領域が存在する。このようにして得た各試行の瞬間濃度を式 (1) により $M (= 10)$ 回の試行について平均した $\hat{C}(x, r, t)$ から求めた等濃度線を図 6 に示す。

$$\hat{C}(x, r, t) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M C_k(x, r, t) \quad \dots \dots \dots (1)$$

図 6 の分布形状は多くの不規則な凹凸を持ち、ここで行った試行の回数が十分に大きくないことが解る。またこの結果からいわずの秩序構造を識別することは困難である。この平均濃度分布を基準として、これからのずれを各試行における変動成分として式 (2) により乱れ度 c' を求めた。

$$c' = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \sqrt{\{ C_k(x, r, t) - \hat{C}(x, r, t) \}^2} \quad \dots \dots \dots (2)$$

式 (2) で求めた c' の噴流軸上の分布を平均的輪郭とともに図 7 に示す。同図に実線で示した円は Witze [4] のモデルによる非定常領域を表す。試行の数 M が十分に大でなく、式 (1) による平均濃度が変動成分を含んでいるにもかかわらず、噴流軸上の濃度の乱れ度には定常領域と非定常領域で明瞭な相違が見られる。

4. 結言 円形ノズルから蛍光染料水溶液を静止水中に突発的に噴出させ、レーザービームを走査させて噴流軸を含む断面の可視化を行った。これを 0.25 秒間隔で連続撮影し、得られた写真をパーソナルコンピュータを援用して定量化して次のような結果を得た。

- (1) 静止流体中を成長する噴流内部の乱れの発達過程を観察した。断面の画像を格子状に分割し各ます目の輝度を数値化して各瞬間のノズル流体濃度分布を決定した。
- (2) 多数回の試行から得られる画像データから、噴流の平均的な形状、濃度分布および等濃度線図の発達の過程を調べた。
- (3) ある程度発達した突発噴流の中心軸上の乱れ度は、定常領域に比べ非定常領域において顕著に大きくなることを確認した。

可視化された流れの画像はある瞬間の場合全体の情報を含んでいるので、これを定量化することにより、流れが非定常、非一様の場合でも乱れの空間的構造を決定することができ

図4 噴流断面の写真

図5 噴流の輪郭と断面上の濃度分布 ($t = 8$ s)

る。本研究で示された手法は、従来の方法では取扱い困難であったこのような乱流の実験的研究において有効な手段を与えるものと考ええる。

文献

- [1] Davies, J. T., Turbulence Phenomena, (1972), 74, Academic Press, New York and London.
- [2] 白樫・河瀬・脇屋、日本機械学会論文集 (B 編)、52-475 (昭61-3)、1032
- [3] Kobayashi, F., Kaneko, K. and Shirakashi, M., Proc. Intern. Sympo. Fluid Control and Measurement, Vol. 2, (1985), 717.
- [4] Witze, P. O., SAND, (1980), 80-8617.

図 6 平均等濃度線 ($t = 8 \text{ s}$) 図 7 Witze のモデルと噴流軸上の乱れの分布 ($t = 8 \text{ s}$)