

2

励起された二次元噴流場の秩序渦構造

蒔田 秀治* 松元 毅* 佐々浩司*

Coherent Vortex Structure
in a Two-Dimensional Excited Jet

by

Hideharu MAKITA, Takeshi MATSUMOTO and Koji SASSA
Dept. of Energy Eng., Toyohashi University

ABSTRACT

Experimental investigation was made for the structure of coherent vortices in a two-dimensional excited jet with a parabolic velocity distribution. Two characteristic modes of velocity fluctuation in the two-dimensional jet, i.e. the symmetrical and anti-symmetrical mode, were acoustically excited to improve the reproducibility in appearance of the vortex arrangement in each exciting mode. The employment of conditional sampling and phase averaging for the hot-wire outputs made it possible to catch the coherent vortex arrangements was clearly observed in vorticity contour maps. In each exciting mode, the convection velocity determined by the vorticity contour map was kept almost constant during the coherent vortex traveled downstream through the linear interaction, nonlinear interaction and randomizing regions.

Keywords: jet, transition, conditional sampling, acoustic excitation, vorticity, convection velocity

1. 緒 言

噴流をはじめとする乱流剪断流中には秩序渦構造が発生する。この秩序渦構造の存在は、剪断乱流場の持つ流体的諸特質に強く影響を与えると考えられ、詳細な研究が進められてきた。その例として、時・空間的に不規則に存在する秩序渦構造を捕らえるため条件付抽出法を用いた実験的研究の計測があげられる。たとえば、Yule¹⁾の円形噴流の混合層中の渦構造に関する研究や、木谷・松村²⁾の二次元円柱後流場における渦構造に関する研究がある。一方、噴流中における秩序渦構造を音波等により励起し、再現性を高めたうえで秩序

渦構造の特質を解明しようとする試みがある。Sato³⁾は、放物線型速度分布を有する二次元噴流中に、基本的速度変動成分に対応する周波数の音波を入射し、噴流中に存在する対称及び逆対称モードの渦構造の励起を行い、その計測を行った。Hussain & Zaman⁴⁾は円形噴流中で、音波励起された秩序渦構造の合体现象に関する解析を、可視化や渦度分布図の計測等により行った。また、噴流中の秩序渦構造の移動速度の決定は重要な問題であるが、Goldschmidtら⁵⁾は平面噴流場で横相関計測を行い、渦構造の大きさにより移動速度が異なることを示した。Wills⁶⁾は軸対称噴流場で縦相関計測を行い、周波数に依存する渦構造の移動速度と、相関係数の集中域間の距離と時間差

* 豊橋技術科学大学

から求められる総体的な渦構造の移動速度が計算されることを示した。

本研究では、放物線型速度分布を有する二次元噴流中の2種類の渦構造、すなわち、噴流軸に対し渦構造が対称に配列する対称モード及び逆対称に配列する逆対称モードをそれぞれ音波により励起し、渦構造の変化から乱流への遷移に至る噴流場全域にわたって条件付抽出法による計測をX型熱線流速計により行った。その計測結果から、各励起モードにおける噴流場の等渦度分布図を計算し、その渦度ピーク位置から秩序渦構造の移動速度を求め、噴流中に存在する秩序渦構造の特質と噴流場の遷移過程に与える影響について調べた。

2. 実験装置及び方法

実験に用いた風洞は、噴出口の形状が矩形断面でスリット幅 $2h=10\text{mm}$ 、高さ 400mm の二次元噴流風洞である (Fig. 1)。噴出口における中心風速は $U_0=6\text{m/s}$ 、レイノルズ数は3850、噴出口における平均風速分布は放物線型である。座標系は、噴出口断面中心を原点とし、流れ方向を x 、流れに対し垂直方向を y 、鉛直方向を z とした。噴流中の渦構造を励起するため整流胴上流部及び測定部側面に設置したスピーカーより音波を入力した。

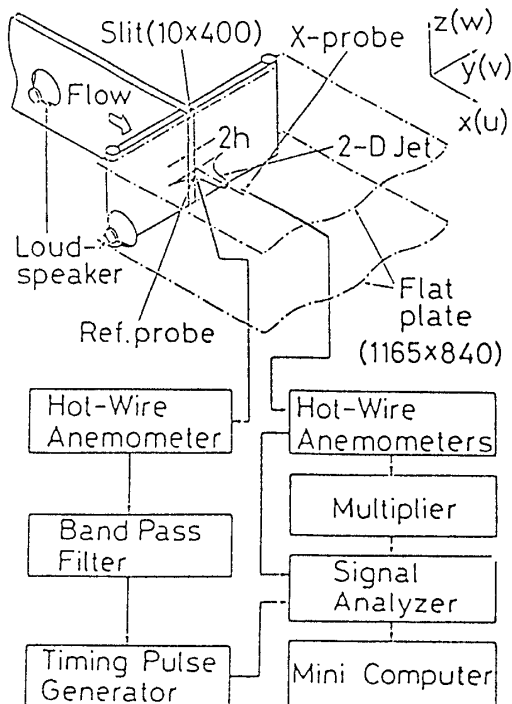


Fig. 1 Schematic diagram of the apparatus

このときの音波の周波数は、対称モード励起では 150Hz 、逆対称モード励起では 95Hz である^{3,7)}。条件付抽出法による計測は参照用に1プローブ、計測用にXプローブ(ワイヤ線径 $2.7\mu\text{m}$ 、長さ 0.6mm 、2線の間隔約 0.2mm)を使用し、測定部中央断面($1165\text{mm}\times 840\text{mm}$)内で行われた。なお、測定点における計測は、参照信号の位相角 θ 一周分信号を128回アンサンブル平均したものを求めた。また、その結果計算される渦度を位相平均渦度 $\langle \omega_z \rangle$ とする。

3. 実験結果及び考察

Fig. 2に参照信号の位相角 $\theta=0^\circ$ に関して、条件付抽出した各励起噴流場の位相平均渦度分布図を示す。(a)が対称モード励起、(b)が逆対称モード励起で、各励起モードによる噴流場における渦構造の配列の違いが明確に観察できる。(a)の対称モード励起の場合、 $x/2h=2.5$ 付近から噴流軸に対して左右対称に渦構造が配列していることが観察される。渦度は渦構造の中心で最も強いが、渦のスケールが下流に向かって成長していくにつれ

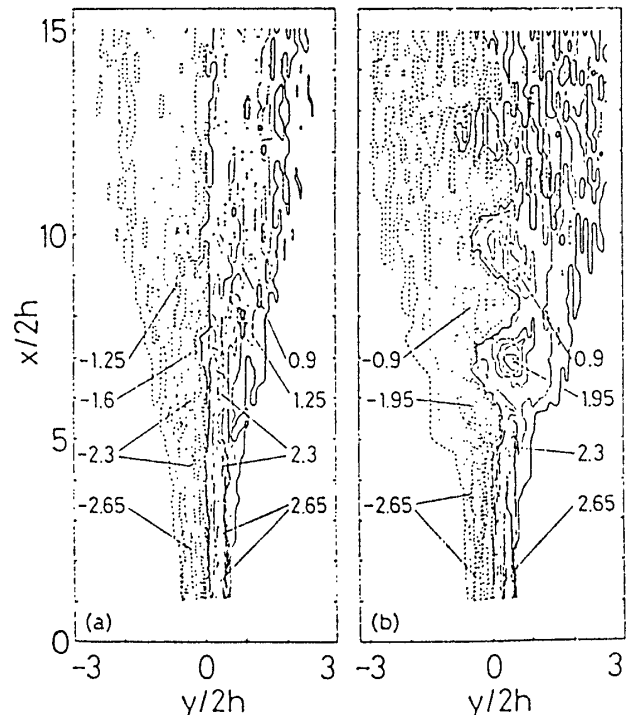


Fig. 2 Contours for vorticity at $\theta=0^\circ$
 $\langle \omega_z \rangle \cdot 2h/U_0 \times 10^{-3}$

- (a) Symmetrical mode excitation
- (b) Anti-symmetrical mode excitation

第に減少していく。 $x/2h=6$ 付近から渦列の対称性が失われ、逆対称配列へと変化していく。この領域では、渦度集中域の分布形状に歪みが生じ、渦の変形と、三次元化が行われている。 $x/2h=11$ より下流の領域においては渦構造が崩壊してスケールが小さく強度の弱い渦塊が均一に分布するようになり乱雑化が進行していることが観察できる。Hussain & Zaman⁴⁾はTop-hat型速度分布をもつ円形噴流を音波により励起すると、渦の合体現象が起きることを示したが、本結果では渦の合体現象は観察されない。この理由として、速度分布が放物線型の噴流はTop-hat型の噴流ほど強い剪断層を持たないため、渦の発達が遅く、スケールの大きい渦構造へと変化した後、相互干渉によって急速に崩壊するためと考えられる。

(b)の逆対称モード励起の場合、 $x/2h=3.5$ 付近から噴流軸に対し左右交互に正、負の渦構造が発達していく様子が観察できる。渦構造は $x/2h=9$ 付近まで急激に成長し、渦スケールは対称モード励起の場合と比べて大きい。 $x/2h=9$ より下流では乱雑化が始まり、細長い渦塊へと変化していく。このような小さい渦塊は、対称モード励起の場合と比較してより上流から密に分布していることより、乱雑化がより上流から起こっていると言える。また、逆対称モード励起では正、負の渦度の境界が噴流軸をまたいで大きく湾曲しており、対称モード励起の場合と比較して噴流の蛇行が顕著であることを示している。噴流幅も、対称モード励起に比較して広く、モードによる渦構造の相違が明確に観察される。また、対称モード励起の渦構造は、配列が変化することや、3次元化が早いことより、逆対称な渦列は、対称な配列よりも安定であると言える。

次に、Fig. 2 に示した励起噴流場の位相平均渦度分布を位相角30度毎に求め、秩序渦構造の渦度ピーク位置の時間変化をFig. 3 に示す。分布の勾配は秩序構造の移動速度(U_c)を示している。

渦構造の移動速度に関して、Oler & Goldschmidt⁹⁾は二次元乱流噴流中の秩序構造の移動速度を等相関分布図から求め、噴出口流速に対する秩序構造の移動速度の割合は流れ方向距離の $-1/$

2乗の関数であることを示した。しかし、本結果によると、両モードの場合ともに明確な渦構造が観察できる領域では、渦構造がほぼ一定速度で移動していることがわかる。

(a)の対称モード励起の場合、 $x/2h=6\sim 7$ 付近で負の渦度のピークが停止することにより、正と負の渦度に位相差が生じ、対称配列から逆対称配列への変化を示している。この配列の変化に伴い勾配が変化していることが分かる。それに対し、(b)の逆対称モード励起の場合は、 $x/2h=4\sim 10$ の範囲ではほぼ一定勾配で移動している。各モードで秩序渦構造の移動速度は異なっており、対称モード励起では $x/2h=1.5\sim 7$ で $U_c \approx 2.7\text{m/s}$ 、 $x/2h=7\sim 11$ では逆対称配列へと移行するため変動するが平均的な U_c の値はそれ程変化していないように見える。逆対称モード励起では $U_c \approx 2.15\text{m/s}$ である。これは、高周波数の対称モード励起の渦が、低周波数の逆対称モード励起の渦より速く移動していることであり、Goldschmidt⁵⁾の指摘と一致している。よって、移動速度の異なる秩序構造が混在する自然噴流では、これらの渦同士の干渉が起こっており、秩序渦構造の移動速度は必ずしもこの様な一定の値とはならない可能性もあり、極めて複雑な場になっていると考えられる。

次に、Fig. 3 から求められた秩序渦構造の移動速度をもとに各励起噴流場の位相角 $\theta=0^\circ$ の場合の速度ベクトル図をFig. 4 に示す。(a)が対称モード励起、(b)が逆対称モード励起である。この速度ベクトル図による各励起噴流場の表示は、局所的な平均速度から U_c を差し引いた値を矢印で表示しており、観察者が秩序渦構造と同じ速度で移動しながら観察していることに相当する。各励起噴流場で秩序渦構造による渦運動が明確に観察できる。

(a)の対称モード励起の場合、 $x/2h=4$ 付近までは噴流軸に対し左右対称に秩序渦構造が配列している。しかし、その下流の $x/2h=6$ 付近から渦配列は逆対称配列へと変化していく。さらにその下流になると明確な秩序渦構造は観察できないようになり、Fig. 2 の渦度分布図と良く一致している。また、渦配列が変化する領域では噴流の蛇行がわ

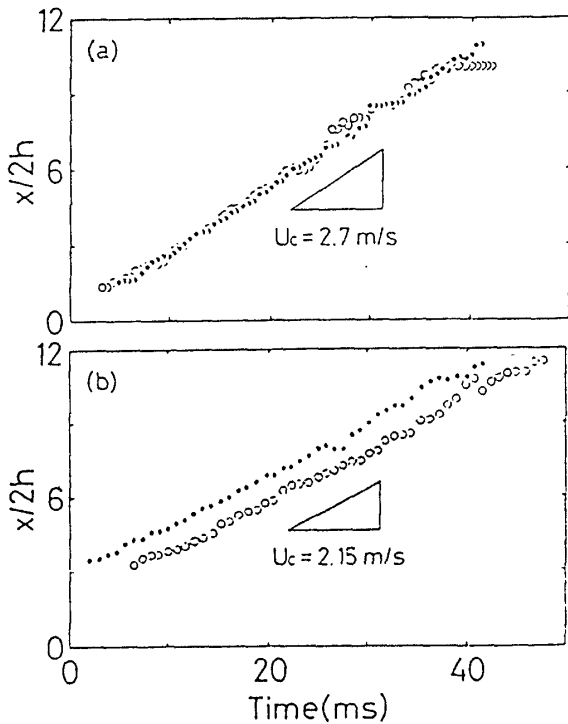


Fig. 3 Time variations of the position of the center of vortex
 (a) Symmetrical mode excitation
 (b) Anti-symmetrical mode excitation
 $+\langle\omega_z\rangle$: ●, $-\langle\omega_z\rangle$: ○

ずかに観察でき、逆対称な渦配列により生じたと考えられる。また、下流の領域においても噴流幅は狭く、このことも渦度分布図と良く対応している。

(b)の逆対称モード励起の場合、 $x/2h=4$ 付近から速度ベクトルの方向が揺らぎ始めるのが観察され、逆対称配列の秩序渦構造の発達と対応している。秩序渦構造は徐々にスケールを拡大していく。それに伴って、 $x/2h=5$ 付近から噴流の蛇行現象が下流に至るまで明確に観察され、逆対称モードを励起したためにより明確に生じたことが分かる。噴流幅は、渦度分布図と同様に、対称モード励起と比較して非常に大きく、乱流への遷移も比較的早いという結果^{7,8,10)}に対応している。

励起された噴流場の等渦度分布図とそれから求められる秩序渦構造の移動速度、速度ベクトル図の結果は、秩序渦構造が単一モードで励起され、それぞれの場合の特徴が強調された結果である。しかし、自然の噴流場ではそれら各モードの渦構造が相互に、また、平均流速場とも干渉し合っ

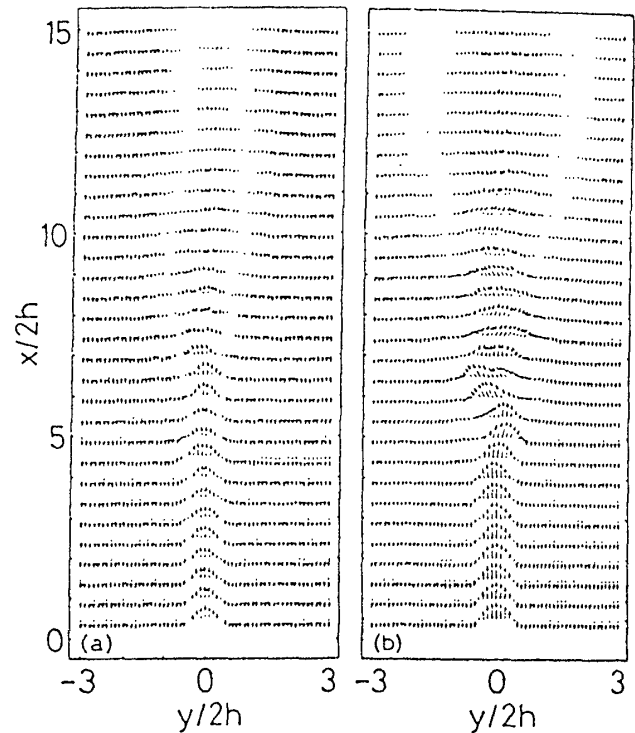


Fig. 4 Distribution of velocity vectors at $\theta=0^\circ$
 (a) Symmetrical mode excitation
 (b) Anti-symmetrical mode excitation
 U_c ; Sym. : 2.70m/s, Anti-Sym. : 2.15m/s

極めて複雑な構造を有していると考えた方が良いと思われる。

4. 結 論

(1) 噴流を音波により励起することにより、対称モード励起では対称の、逆対称モード励起では逆対称の渦配列が渦度分布図より明確に観察されるようになる。

(2) 逆対称配列の場合の方がよりスケールが大きく、強固な構造を持つ。また、対称配列の渦構造は非線形干渉領域で逆対称配列へと移行することから、噴流中では逆対称配列の渦構造の方がより安定である事が分かる。

(3) 両励起の場合とも明確な秩序渦構造が観察される領域では、渦構造の移動速度は局所平均流速とは無関係に一定である。また、対称モード励起の場合の方が逆対称モード励起の場合よりも大きい。

(4) 逆対称配列の渦構造は、噴流の蛇行を引き起こし、急速に噴流幅を広げるとともに乱流への遷移が早まる。

参 考 文 献

- 1) Yule, A. J., *J. Fluid Mech.*, 89 (1978), 413.
- 2) 木谷・松村, 機械学会論文集B編, 51-463 (1985), 775.
- 3) Sato, H., *J. Fluid Mech.*, 7 (1960), 53.
- 4) Hussain, A. K. M. F. & Zaman, K. B. M. Q., *J. Fluid Mech.*, 101 (1980), 493.
- 5) Goldschmidt, V. W. et al, *J. Fluid Mech.*, 105 (1981), 327.
- 6) Wills, J. A. B., *J. Fluid Mech.*, 20 (1964), 417.
- 7) 蒔田, 他 2 名, 機械学会論文集B編, 54-504 (1988), 1938.
- 8) 蒔田, 他 2 名, 機械学会論文集B編, 54-504 (1988), 1946.
- 9) Oler, J. W. & Goldschmidt, V. W., *Proc. of Third Symposium on Turbulent Shear Flows* (1982), 11.1.
- 10) 蒔田, 他 2 名, 機械学会流体工学部門講演論文集, 900-54 (1990), 92.
- 11) 蒔田, 他 2 名, 機械学会論文集B編, 投稿中.

