細い円柱の乱流噴流に及ぼす影響*

(二次元乱流噴流の乱流エネルギースペクトル測定)

小 川 信 夫^{*1}, 牧 博 司^{*1}

Effect of a Slender Bar on a Turbulent Jet (Turbulent Energy Spectrum Measurements of a Two-Dimensional Turbulent Jet)

Nobuo OGAWA and Hiroshi MAKI

A study was made of the effect of a body for example a slender bar, placed in the center of a two-dimensional turbulent jet flow fields, which directly influences the mechanism of fluctuant velocity fields. It was evident in the previous report that the effect of a body on turbulent jet flow fields is different depending on it's locations. Turbulent energy transportation due to a cylinder placed in turbulent jet flow fields was investigated by Keffer, Kanamoto & Roshko, but the peculiarity in placing a cylinder in the center of turbulent jet flow fields was not dealt with. The present investigation is undertaken to measure the turbulent energy spectrum of turbulent jet flow fields with or without a body, and to study the effect of a body on turbulent energy transportation.

Key Words: Two-Dimensional Turbulent Jet, Hot-Wire Anemometer, Turbulent Energy Spectrum, Nonisotropic Free Turbulence, Turbulent Energy Transportation

1. 結 言

著者らのこれまでの報告によれば、非等方的な乱流噴流の流れ場に小さな物体、例えば細い丸棒のような物体を置く場合、流れ場の構造に対するその物体の位置により流れ場に及ぼす影響に大きな差が存在することがわかった⁽¹⁾⁽²⁾。特に、対向衝突噴流においては噴流中心におかれた小さな物体（乱れの大きさに対しては比較的大きい）により乱れ場に大きな影響が与えられ、衝突面位置を決定するうえで重要な因子を形成することがわかった。

従来、噴流中に円柱をおいた場合の変動エネルギー輸送についてふれた研究はいくつかあり、円柱により励起される変動エネルギーが線スペクトル的に与えられ、それが後に拡散するということが明らかにされているが^{(3)~(6)}、噴流中心に円柱が置かれた場合の特異性に注目した研究はない。本研究は、乱流噴流のように乱れ場が非等方的であり、異方向間の変動エネルギー輸送圧力拡散を通じて行われる場合⁽⁸⁾⁽⁹⁾、二次元噴流中心および中心外におかれた物体が変動エネルギー輸

送に及ぼす影響を実験的に調べたものである。

2. 主 な 記 号

- b : 噴流幅
- C : 抗力係数
- d : 円柱直径
- e, e' : 熱線 D. C. および A. C. 出力
- E : 変動エネルギー
- $F(k)$: エネルギースペクトル
- h : 二次元ノズル出口高さ
- k : 周波数
- P : 確率
- R : レイノルズ数 $= Uh/\nu$ (U : x 方向平均流速)
- u', v' : x, y 方向変動流速
- $q^2 = u'^2 + v'^2$
- x, y : 座標
- α : 噴流中心と熱線のなす角 (図 3)
- ν : 動粘性係数
- 添 字
- b : 丸棒位置
- ex : ノズル出口
- m : 最大値

* 昭和 62 年 4 月 3 日 第 64 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 61 年 7 月 2 日。

^{*1} 正員、東京理科大学 (〒278 野田市山崎 2641)。

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置 本実験に用いた実験装置および座標系を図1に示す。ブロウより供給された空気は、流量調整バルブを介して整流部を通り二次元ノズルへ送られる。二次元ノズルはノズル高さ15 mm, アスペクト比20である。また、平行流路部の長さは600 mmである。測定点は図1中に示すような位置とし、熱線プローブの位置設定および回転運動は二次元トラバース装置に熱線プローブ回転装置を取付けたものを用いた。トラバースおよびプローブ回転装置の制御、さらに、熱線流速計、高速フーリエ変換器の測定値の読取りはマイクロコンピュータで行い、測定値はディスク装置へ記録し実験終了後整理するようになっている。

3.2 実験方法

3.2.1 熱線プローブの測定可能範囲 実験においては流れの方向に対して熱線を傾けて用いるため、流れの方向に対してブロングの影響がセンサ部に及ぶ範囲を定めておく必要がある。

図2に示すように、太さ $5\mu\text{m}$ 、センサ部長さ1 mm、ブロング間隔2 mmの熱線プローブを一樣流中に設置し流れの方向と熱線のなす角 α について熱線出力を測定する。熱線はある α の範囲においてはブロングの伴流の影響をうけるものと考えられる。

図3に一樣流中における α と熱線出力の関係を示す。センサは $\alpha < 30^\circ$, $\alpha > 150^\circ$ の範囲においてブロングの伴流の影響を強くうけこの範囲は測定できないことがわかる。また、この範囲では円柱(ブロング; 外径

図1 実験装置および測定位置

200 μm) の伴流幅を次式で用いて算出した場合ともよく一致している⁽¹⁰⁾。

$$b = 0.57 \sqrt{x C_d} \dots\dots\dots (1)$$

3.2.2 変動成分の方向特性とエネルギースペクトルの測定 変動成分の方向特性は図2に示したように、各測定点において流れの方向に対して熱線を回転させ熱線流速計から出力される A. C. 成分の RMS 値の時間平均値を各 α について測定することにより論じた。また、変動成分のエネルギースペクトルは、熱線を流れの方向に対し回転させ、熱線流速計出力の A. C. 成分が最大値を示す方向を変動成分 q の時間平均的な方向とみなし測定した。なお、測定値は時間で約15秒間、個数400個の測定値の算術平均値その値とした。また、図2中に示したように、噴流中に置かれた丸棒の y 方向位置により流れの場を次のようにに分ける。すなわち、噴流中に丸棒のない場合、噴流中心に丸棒のある場合、噴流中心より $y = h/3$ 離れた位置に丸棒のある場合をそれぞれタイプ1, 2, 3と呼ぶこととする。

4. 実験結果と考察

4.1 変動成分の方向特性 3.2.2項で述べた方法により測定した変動成分の方向特性の一例を図4に示す。

噴流中心においてタイプ1では $\alpha = 90^\circ$ に熱線出力

図2 流れに対する丸棒位置と熱線方向

図3 流れの方向に対する熱線の使用限界

の最大値を持つがタイプ2では、丸棒の影響を受け $\alpha = 40^\circ, 130^\circ$ 近くにピークを二つ持つような分布となる。タイプ3については、同じ位置におけるタイプ1と比較して変動成分の最大値の方向が大きく変化していることがわかる。すなわち、タイプ1では $\alpha = 72^\circ$ にピークを持ちタイプ3では $\alpha = 91^\circ$ にピークを持つようになる。これはタイプ2のように噴流中心の流れの諸量の対称性がある場合と異なり、タイプ3の場合は丸棒の流れに及ぼす影響も非対称的であるためと考えられる。そしてこのことは、タイプ2の場合は丸棒が流れ場の広い範囲にわたり影響を及ぼすのに対し、タイプ3の場合はその影響が丸棒の近くのみの局所的な

図4 流れに対する熱線の方向と熱線出力

図5 噴流初期領域内エネルギースペクトル

ものにとどまる原因の一つと考えられる。

4.2 変動成分エネルギースペクトル 図5, 図7に変動成分 q のエネルギースペクトルを、また、図6, 8にはその振幅ヒストグラムをタイプ1, 2, 3の場合についてそれぞれ示す。

図5, 6より明らかなように、タイプ1の場合噴流初期領域内では、噴流外縁において励起された乱れは振幅と周波数はともに広い範囲に分布していることがわかる。噴流中心においてはノズル内からの履歴により振幅は非常に小さくそれだけ消散の影響が大きくなる。

タイプ2の場合は噴流中心に置かれた丸棒により励起された乱れは3.2 kHz近くで線スペクトル的にエネルギーが集中しさらにそれより低波数帯および高波数帯にもエネルギーが分布していることがわかる。このように変動エネルギーが線スペクトル的に励起される現象は過去の研究⁽⁶⁾⁽⁷⁾においても報告されており、丸棒上の境界層のはく離により生じるものと考えられている。本実験において測定された線スペクトル的に励起される変動エネルギーの周波数は、Roshko⁽⁶⁾の結果に見られる発生周波数 k とレイノルズ数との関係 $kd^2/\nu = 0.212R - 2.7$ より算出した値 $k = 3.045$ kHz ($\log k = 3.48$) とよく一致する。タイプ2の場合噴流中心において u' に関するエネルギースペクトル (図中▲印) は q に関するスペクトルと異なり3.2

図6 噴流初期領域内振幅ヒストグラム

kHz 近くのピークは見られず高波数成分の増加のみが見られ、噴流中心に置かれた細い丸棒は主に y 軸方向乱れ成分に線スペクトル的にエネルギーを与えるものと考えられる。

噴流対称面に細い丸棒を設置することは、平均流エネルギーの一部を変動エネルギーへ変換し、それが前述のごとくある特定の周波数帯へ集中的に励起されることとなる。そして、さらに非線形作用により他の周波数帯へ変動エネルギーが伝達されるものと考えられる。

タイプ3の場合は図5, 6に示されるように、丸棒直後においてはタイプ2の場合と同様の現象が生じるが、流れ場に対して非対称な現象であるため対流の影響が大きく、その効果は局所的であり全体としては消失する方向へ向かうものと考えられる。図6より明らかなように、噴流中に設置された丸棒は振幅の大きな変動成分を励起し、図5に示されるようにそれが高周波数帯に多く分布していることを考えると、その位置での変動エネルギーレベルは大きなものとなっていることが考えられる。以上のような傾向は、図7, 8に示される、 $x/h=10$ の噴流発達領域においても同様である。噴流発達領域においては、噴流中心においても振幅の大きな変動成分がみられ、Rockwellら⁽¹¹⁾あるいはCrowら⁽¹²⁾の報告に見られるように大規模な渦構

造が存在するものと考えられる。エネルギースペクトルは噴流断面内においてほぼ同様であり、初期領域での値と比較して $y/h=0.67$ 以外では大きな値をもつことがわかる。

図9, 10に噴流軸上のエネルギースペクトルおよび振幅ヒストグラムの変化を示す。

噴流初期領域内においてタイプ2の場合は、 $x/h=1.67$ において線スペクトル的に測定された振幅の大きな変動エネルギーは速やかに伝達、拡散され、 $x/h=5$ の位置においてはタイプ1の場合と同様なエネルギースペクトルとなる。従来の円柱伴流の研究では、カルマン渦列あるいは渦の大規模構造の存在を示すエネルギースペクトルが測定され、その影響は円柱の相当下流まで残されていることが明らかにされている。前述のように、本実験で示された結果は細い丸棒により励起された渦のエネルギースペクトルであり、小さなサイズの流れが乱れ場全体に大きな影響を与えるような場合には顕著にその影響が現れるものと考えられる⁽¹⁾。せん断乱流におけるエネルギースペクトルを理論的に求めることは困難な問題であるがここでは比較のため等方性乱流において仮定的に求められた kolmogorov スペクトル ($-5/3$ 乗スペクトル) および Heisenberg スペクトル ($-5/3$ 乗, -7 乗スペクトル)^{(13)~(15)}を図5, 7, 9中に示した。 $-5/3$ 乗スペクトルは慣性小領域において成立するが、本実験結果においてはそれに近い領域の存在が測定されている。ま

図7 噴流発達領域内エネルギースペクトル

図8 噴流発達領域内振幅ヒストグラム

た、高波数帯における -7 乗スペクトルについても傾向として一致する領域が存在することが分る。

4.3 変動エネルギーの分布 変動エネルギーはエネルギースペクトルの積分として次式のように求め

図9 エネルギースペクトルの噴流軸方向分布

図10 振幅ヒストグラムの噴流軸方向分布

られる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

$$1/2q^2 = \int_0^\infty F(k)dk \quad (2)$$

式(2)より算出した変動エネルギーの流れの断面内における分布をタイプ1, 2, 3について図11に示す。図11に示す $x/h \leq 3$ での噴流初期領域内においてタイプ1の場合、変動のエネルギーは噴流中心において特に小さくノズル内の変動成分の履歴と考えられ

図11 変動エネルギー噴流断面内分布

図12 変動エネルギー噴流軸方向分布

る。また $y/h=0.7$ の位置でピークが見られ、噴流外縁で生じた大規模渦構造の存在が考えられる。噴流中に丸棒を挿入したタイプ2, 3の場合は、その位置において変動エネルギーは著しく増加しており、平均流エネルギーの一部が変動エネルギーへ変換されていることがわかる。タイプ2の場合は変換される平均流エネルギーが大きく丸棒の影響が対称的であるためタイプ3と比較して流れ場に与える影響は大となる。

図12に変動エネルギーの x 軸方向分布をタイプ1, 2, 3についてそれぞれ示す。ノズル出口近くでは噴流中心における変動エネルギーは $y/h=0.33$ における値より小さいがノズル出口より十分遠方では両者の値に差は見られない。また、タイプ2, 3の場合とも丸棒により励起された変動エネルギーは拡散により比較的速度やかにタイプ1のレベルに戻る。ある定常的なエネルギーのバランス状態にある乱流噴流において、タイプ2, 3のように噴流中に丸棒を挿入することによりそのエネルギーのバランス状態を変化させた場合その変化の状況により流れ場に与える影響が異なることは容易に考えられる。本実験で行ったように、大規模な渦構造を伴わないような小さな物体により励起された乱れはその大きさも小さく、したがってエネルギーの伝達、拡散も速くなると考えられる。

既報⁽¹⁾において述べた対向衝突噴流のように、噴流中心軸上の変動圧力が流れ場を決定するうえで重要な役割を果たす場合は、乱流噴流の乱れの大きさに比較して大きな物体を噴流中心に挿入することにより、流れ場全体は決定されることがわかる。

5. 結 論

- (1) 乱流噴流中に細い丸棒を挿入した場合、それ

により励起される変動のエネルギーは線スペクトル的な部分を含んだエネルギースペクトルとなり、渦の規模は小さく伝達、拡散は速やかとなる。また、線スペクトル的に励起されるエネルギーは主に y 軸成分エネルギーであることがわかった。

(2) タイプ2の場合、丸棒が乱れの構造に及ぼす影響は噴流断面内において対称的となり流れ場に及ぼす影響は大となるが、タイプ3の場合は対流の影響が大きく丸棒の影響は局所的な現象に止まる。

(3) 乱流噴流における噴流軸方向の変動エネルギーの分布は図12のタイプ1の場合のようになり、噴流中に細い丸棒を挿入することによりその位置での変動のエネルギーは増加するが、タイプ2の場合は特に大きな値となる。

文 献

- (1) 牧・小川, 機講論, No. 840-13 (昭59-10), 61.
- (2) 小川・牧, 機論, 52-473, B (昭61), 318.
- (3) Keffer, J. F., *J. Fluid Mech.*, 22-1 (1965), 135.
- (4) Keffer, J. F., *J. Fluid Mech.*, 28-1 (1967), 183.
- (5) 金元・豊倉, 機論, 48-425, B (昭57), 18.
- (6) Roshko, A., *NACA Rep.*, 1191 (1954).
- (7) 白樫・ほか3名, ながれ, 3 (昭59), 128.
- (8) Batchelor, G. K., *Proc. R. Soc., Ser. A*, 186 (1946), 480.
- (9) ロッタ (大路訳), 乱流, (昭50), 110, 岩波書店.
- (10) Shlichting, H., *Boundary-Layer Theory*, (1968), 692, McGraw-Hill.
- (11) Rockwell, D. O. and Niccolis, W. O., *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, (1972), 720.
- (12) Crow, S. C. and Champagne, J., *Fluid Mech.* 48-3 (1971), 547.
- (13) Heisenberg, W., *Z. Physik*, 124 (1948), 628.
- (14) Reid, W. H., *Phys. Fluids*, 3-1 (1960), 72.
- (15) Uberoi, M. S., *Phys. Fluids*, 6-8 (1963), 1048.

討 論

〔質問〕 山田 日出夫〔名古屋工業大学〕

d/h の影響について伺いたい。すなわち、 d/h が零に近づけば当然円柱の影響はなくなるはずだが、それは d/h がどの程度であればよいのか。これはもちろん x/h の位置にも、また Re 数にも依存すると考えられるがいかがか。

〔回答〕 噴流中に挿入される丸棒の太さの影響は

前報において一部論じられている。実際の噴流は流れ場にいくつかの理由により乱れが入り、定常的かつ空間的にその中心を定めることはできない。丸棒の太さ d/h がその噴流中心の変動の範囲 (x/h および Re 数に依存する) を埋めることのできる太さであれば本報において述べたタイプ2の現象は生ずるものと考えている。