対向衝突乱流噴流の研究*
(噴流中心の乱れと衝突面位置)小川 信夫^{*1}, 牧 博 司^{*1}, 土方 邦夫^{*2}Studies on Turbulent Opposed Jets
(The Relation Between the Location of the Impinging Surface
and the Turbulence in the Jet Center)

Nobuo OGAWA, Hiroshi MAKI and Kunio HIJIKATA

From our previous reports, it is clarified that the fluctuations in the jet center have an important effect on opposed turbulent jet flow fields. In the jet center, where symmetrical flow fields are characterized, the turbulent structure will be different from those in other parts of the jet. In the turbulent opposed jet center, the fluctuating velocity plays role equal in importance to that of the mean velocity. The momentum which locates the impinging surface comprises three parts: that is, a mean velocity, a static pressure and a fluctuating velocity. The present paper deals with the influences of the variations of the fluctuating velocity, employing the turbulent lattice in the center of turbulent opposed jets, to the locations of the impinging surface.

Key Words: Turbulent Opposed Jets, Location of Impinging Surface, Fluctuating Velocity, Momentum in the Jet Center, Hot-Wire Anemometer

1. 緒 言

対向して衝突する二つの乱流噴流により構成される対向衝突乱流噴流における衝突面位置は非常に不安定とされているが⁽¹⁾⁽²⁾, 著者らはこれまでに噴流軸上の変動成分が衝突面位置を決定するうえで重要な役割を果たしていることを指摘した⁽³⁾⁽⁴⁾, また, 対向衝突乱流噴流の乱れが大きい場合, 衝突面位置が対向する噴流の平均流速のみでは決定されないことを示した⁽⁵⁾. そこで, 本研究では, 対向衝突乱流噴流において, 一方の噴流軸上の乱れをノズル内に設置した乱流格子により増加させ, 噴流軸上の乱れの大きさを定量的に変化させることにより噴流中の乱れが衝突面位置にどのように影響を与えるかを定量的に明らかにした。

2. 主 な 記 号

D : ノズル 1, 2 出口直径
 E : 熱線流速計出力
 L : ノズル 1, 2 間距離
 P : 静圧

P_a : 噴流外縁での静圧

Re : レイノルズ数 $= UD/\nu$

U, V : x, r 方向平均流速

u, v, w : x, r および旋回方向の変動流速

x, r : 座標 (図 3)

ν : 動粘性係数

ρ : 密度

添 字

$_{1,2}$: ノズル 1, 2 出口

$_L$: ノズル 1 に乱流格子を設置した場合

$_m$: 最大値

$_s$: 衝突面位置

3. 実験装置および方法

図 1 に実験装置の概略を示す。出口内径 35 mm のノズル 1, 2 を図 1 のように対向させ, それぞれ別のブロウにより室温の空気を供給し, バルブにより流量を調節, 対向衝突乱流噴流の流れ場を形成させる。ノズル 1 には, 出口より 30 mm 上流側に乱流格子を設置できるようなフランジが設けられている。用いた乱流格子は 2 種類でそれらの寸法を図 2 に示す。流速測定には太さ 5 μm , センサ部長さ 1 mm のタングステン線の熱線を用いた。また, 衝突面位置の測定は, 図 3 に

* 原稿受付平成 2 年 4 月 27 日。

^{*1} 正員, 東京理科大学理工学部 (〒278 野田市山崎 2641)。

^{*2} 正員, 東京工業大学 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

出力波形を示したものが図5である。この場合でも両方のノズル流速に大きな差があるときには(○, ●に対応)衝突面位置はノズル出口近傍に安定して存在するが、ほぼ両方の流速が等しいときの衝突面位置は必ずしも一つでなく、図5に示すように2箇所にピークを持つ場合もある。(図5中の●に対応)図5中の x_3 , x_4 , x_5 での熱線出力の相互関係を見ると、 x_3 での熱線出力が観察されていないときに x_5 での出力が生じていることから(なお、図5中の x_3 , x_4 , x_5 における出力波形の時刻は統一されていないので、三つの信号の時刻を合せた比較は意味を持たない点に注意)、衝突面位置が二つの安定点 x_3 と x_5 の間を時々移動していることがわかる。実験では出力強度の大きなほうを衝突面位置とした。なお、二つの安定点が存在する理由については後に考察する。

4. 衝突面での噴流軸上運動量の釣合い

すでに報告されているように、対向衝突乱流噴流においては、噴流の軸中心での流れの状態が衝突面位置を決定するうえで重要な役割を果たしている^{(3)~(5)}。

すなわち、対向衝突乱流噴流において、両者の流速がほぼ等しいとき、図3に示すように衝突面が一方のノズル側に存在する場合、位置Aに噴流軸と垂直に板を挿入することにより衝突面をその板の位置にまで移動させることができる。この移動は板の先端が噴流軸に達しない限り生じない。板を挿入することにより、ノズル1の噴流の運動量は減少するので、もし、噴流の全運動量が支配的な因子であれば、板が噴流中心に到達しなくても衝突面は板のほうへ移動するはずである。しかし、板が噴流中心に達してはじめて移動が生じることから、全運動量より噴流軸上の状態が衝突面位置を決定するほど大きな影響力を持っていることがわかる⁽³⁾⁽⁵⁾。そこで本研究では、以上のような実験的事実に基づいて、噴流軸中心上の運動量のバランスを考え、乱れの大きさが衝突面位置におよぼす影響を明らかにする。図3に示すように座標軸をとり平均流速の旋回がないものとすれば、次式に示すような運動方程式が成立する⁽⁶⁾。なお、軸方向と半径方向の時間平均と変動の速度成分を U, V, u, v で示し $\bar{}$ は時間平均を表す。

$$\begin{aligned} V \frac{\partial U}{\partial r} + U \frac{\partial U}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) - \left(\frac{\partial \overline{uv}}{\partial r} + \frac{\partial \overline{u^2}}{\partial x} + \frac{\overline{uv}}{r} \right) \dots\dots\dots (1) \\ V \frac{\partial V}{\partial r} + U \frac{\partial V}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} \right. \end{aligned}$$

$$\left. + \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - \frac{V}{r^2} \right) - \left(\frac{\partial \overline{uv}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v^2}}{\partial r} + \frac{\overline{v^2}}{r} - \frac{\overline{w^2}}{r} \right) \dots\dots\dots (2)$$

噴流軸上では $\partial U/\partial r=0$, $\partial u/\partial r=0$ としてよい。またレイノルズ数の大きいときは分子粘性は無視できるから、連続の式を考慮すると式(1)は

$$\frac{1}{2} \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{u^2}}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

となり、積分して次式が得られる。

$$\frac{1}{2} U^2 + \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} \overline{u^2} = \text{const.} \dots\dots\dots (4)$$

一方、式(2)より衝突面近傍をのぞく任意の断面で

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial \overline{v^2}}{\partial r} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

と表せ、式(5)は積分して $(P_a - P)/\rho - \overline{v^2} = 0$ となる。乱れを等方的と仮定すれば⁽⁷⁾

$$\frac{P}{\rho} = \frac{P_a}{\rho} - \overline{u^2} \dots\dots\dots (6)$$

となる。

式(6)と式(4)より次式が導かれる。

$$\frac{1}{2} \rho (U^2 - \overline{u^2}) + P_a = \text{const.} \dots\dots\dots (7)$$

式(7)は衝突面位置を決定するうえで重要な^{(3)~(5)}衝突噴流軸上で成立するので、衝突面の左右の流体の釣合いから、対向衝突乱流噴流の一方の噴流の乱れを増加した場合、より大きな平均流速を与えない限り、衝突面での力のバランスがくずれ衝突面は乱れの多いほうへ移動するものと考えられる。これらの点を明らかにするために実験を行った。

5. 対向する二つの噴流の特性

5.1 噴流中心の平均流速および変動流速分布

4章で述べた式(7)を噴流軸上に適用するためには、噴流の中心軸上の乱れのみを変化させる必要がある。

そこで本実験ではコア領域における平均流の分布が大きく変化しないようにノズル1へ乱流格子を設け噴流全体の乱れを一様に変化させた。

はじめに、乱流格子を設置した場合を含めノズル1と、ノズル2の噴流の特性を明らかにしておく。噴流の流速測定は、ノズル1とノズル2は対向させた状態で一方の噴流をとめて測定した。

図6~9にそれぞれの実験条件における噴流軸上の平均流速と乱れの分布を示す。ノズル間距離は $L/D=4.3$ (噴流が初期領域で衝突する場合)と $L/D=8.57$ (噴流が発達領域も含めて衝突する場合)の2とおりについて行った。図6に $L/D=4.3$, $Re_1=Re_2=5.61 \times 10^4$ の場合を示す。図6(a)に示すようにノズル1の場合

も2の場合も噴流の平均流速は、噴流のコア領域内であるためほぼ一定である。また、図6(b)に示すようにノズル1に乱流格子1, 2を設置した場合も、平均流速の流れ方向への減衰はほとんど増加しない。図6(a), (b)いずれの場合においても、対向して設置されているノズル出口の近傍(ノズル1側の噴流についてはノズル2出口近く、ノズル2側の噴流についてはノズル1出口近く)になると平均流速の低下が見られるが、これは噴流の特性というより相手のノズルの存在の影響による。図6(a)に示す乱流格子を設置しない場合、風洞の特性の違いにより乱れの程度はノズル2の場合はわずかにノズル1より小さい。

一方、ノズル1へ乱流格子1, 2を設置した場合は、図6(b)に示すようにノズル1出口近くで乱れは特に大きく、ノズル1, 2間の領域全体でも大きくなっており、衝突面に与える乱れの効果を定量的に検討することができると考えられる。

図7に $L/D=4.3$, $Re_1=Re_2=8.58 \times 10^4$ の場合の平均流速と乱れの分布を示す。レイノルズ数が多い場合でも図6に示す $Re_2=5.61 \times 10^4$ の場合と同様に平均流速に対する影響は少ないが、乱流格子を設置した場合の乱れの大きさは、 $Re_2=5.61 \times 10^4$ の場合よりは

るかに増加していることがわかる。

図8と図9にはノズル間の間隔 L を増し、 $L/D=8.57$ とした場合の結果を示す。レイノルズ数は図8が $Re_1=Re_2=5.61 \times 10^4$, 図9が $Re_1=Re_2=8.58 \times 10^4$ の場合である。

図8に示すように平均流速の分布は $x/L=0.5$ 程度から減少しており、これは相手のノズルの存在による減少ではなく、噴流の発達そのものによる減少である。

特に乱流格子を設置した場合、コア領域が消失した後の噴流発達域での平均流速の減衰が大きい。一方、乱れの分布は、ノズル1へ乱流格子2を設置した場合、乱れはノズル1出口近くで大きな値であり、それが拡散で減衰しコア領域の終了とともに再び増加している。 $Re_1=Re_2=8.58 \times 10^4$ の場合、コア領域後の乱れが多少大きくなる。

5.2 平均流速と乱れの r 軸方向分布 流れの発達の様子をより詳細に見るために、図10(a)~(c)に、 $Re_1=5.61 \times 10^4$ で乱流格子1, 2を設置した場合と、設置しない場合のノズル1の噴流の平均流速と乱れの大きさの r 軸方向分布を示す。図10(a)に示す乱流格子のない場合は、ノズル1出口近くの $x/D=0.18$

(a)

(a)

(b)

($L/D=4.3$, $Re_1=Re_2=5.61 \times 10^4$)

図6 噴流中心の平均流速および乱れの x 軸方向分布

(b)

($L/D=4.3$, $Re_1=Re_2=8.53 \times 10^4$)

図7 噴流中心の平均流速および乱れの x 軸方向分布

での乱れの分布は平坦でその値も小さく、 $x/D=3.57$ でも中心の平均流速、変動流速とも大きな変化は見られない。図10(b)に示す乱流格子1を設置した場合、 $x/D=3.57$ ($L/D=4.3, 8.57$ では $x/L=0.83, 0.42$ にそれぞれ対応)では平均流速の減衰が若干認められる。

また、ノズル出口近く($x/D=0.18$)における乱れは、乱流格子のない場合より大きい。が、 $x/D=3.57$ になると乱流格子のない場合と同様の分布になり、乱流格子による初期乱れより噴流のせん断層による乱れの生成が支配的であることがわかる。図10(c)に示す乱流格子2を設置した場合は、ノズル出口近く($x/D=0.18$)での乱れが非常に大きく、その影響は $x/D=3.57$ の位置までおよび、噴流の幅の広がりも大きくなっている。

6. 衝突面が安定する位置

式(7)は $P_a=\text{const.}$ であるから衝突面位置が対向する二つの噴流の $(U^2-\bar{u}^2)$ の値の大きさにより決定されることを示している。そこで以下に乱流格子、ノズル間隔などにより $(U^2-\bar{u}^2)$ がどのように変化するかを示す。図11には図6で示す $L/D=4.3$, $Re_1=5.61 \times 10^4$ の場合の、また、図12には図8で示す $L/D=8.57$, $Re_1=5.61 \times 10^4$ の場合のノズル1の $(U^2-\bar{u}^2)$

の x 軸方向の分布を示す。

図11において $x/L=x_1, x_3, x_5$ の位置は図4, 5の衝突面位置に対応して示している。図11に示す $L/D=4.3$ の場合は、乱流格子を設置しないと $(U^2-\bar{u}^2)/U^2$ の値は全域で一定値に近く、流速の変化に対し衝突面位置は敏感に変動することを意味している。一方、乱流格子2を設置した場合は、 x_3 と x_5 の間で $(U^2-\bar{u}^2)/U^2$ の値が逆こう配となるためこの区間で衝突面位置は揺れ動くことを意味しており、図4に示した衝突面の変動を非常に良く説明していることがわかる。

図12に示す $L/D=8.57$ の場合、乱流格子がないときも $(U^2-\bar{u}^2)/U^2$ の値が一定値に近い領域は少なく(コア領域の長さが相対的に短くなる)、 $L/D=4.3$ の場合より衝突面位置が安定して定まる場合が多いことを示している。また、乱流格子2を設置した場合、 $(U^2-\bar{u}^2)/U^2$ の値が一定値に近い領域は $0.15 < X/L < 0.36$ とさらにせまく極大値も存在しない、このことは

($L/D=8.57, Re_1=Re_2=5.61 \times 10^4$)

図8 噴流中心の平均流速および乱れの x 軸方向分布

($L/D=8.57, Re_1=Re_2=8.58 \times 10^4$)

図9 噴流中心の平均流速および乱れの x 軸方向分布

○ U/U_m } 0.18
● $\sqrt{u^2}$ }
△ U/U_m } 3.57
▲ $\sqrt{u^2}$ }
L/D=4.3
Re2=5.61x10⁴

図10 平均流速および乱れの半径方向分布

$L/D=4.3$ の場合のように二つの衝突面位置が存在できないことを示しているが、実験的にも二つの衝突面が測定されることはなかった。

さらに、以下に衝突面位置について定量的に検討する。

7. ノズル 1, 2 の出口平均流速比と衝突面位置

7.1 ノズル間距離 $L/D=4.3$ の場合 図 13, 14 にノズル 1 へ乱流格子を設け、ノズル 1 側の噴流のみに乱れを与えた場合のノズル 1, 2 出口流速比と衝突面位置との関係を示す。

対向衝突乱流噴流の衝突面位置は、図 13(a) に示されるように、 U_1/U_2 の小さな変化が衝突面位置を大きく変化させる $0.25 < x_s/L < 0.75$ の領域と、ノズル 1 出口近くの $x_s/L < 0.25$ 、さらにノズル 2 出口近くの $0.75 < x_s/L$ の二つの領域に大きく分けられる。

図 13(a) に示すように、乱流格子 1 を設置することによりノズル 1 側の噴流軸上の乱れを大きくすると、 $0.25 < x_s/L < 0.75$ の領域に衝突面を固定するために、乱流格子を設置しない場合より大きな U_1/U_2 が必要であることがわかる。すなわち、式(7)で示されるように、乱流格子により噴流軸上の乱れを増加させた場

合、同じ位置に衝突面を保つには、乱れの増加分に見合うだけ大きな平均流速 U_1 の値が必要となることに対応する。

一方、 $x_s/L < 0.25$ の領域ではノズル 1 の流れは衝突面の存在のためにすでに変化していると考えられる。ノズル 2 の流れはノズル 1 の乱流格子の影響を受けないので、乱流格子の存在の影響は現れにくい。

一方、 $x_s/L > 0.75$ の領域に衝突面が存在する場合は、図 4 に示されるようにノズル 1 側の噴流の平均流速はノズル 2 出口近くでは減衰し、乱流格子により噴流軸上の乱れが増加していることから、さらに大きな U_1/U_2 が必要となることがわかる。

図 13(b) に示す $L/D=4.3$, $Re_2=8.58 \times 10^4$ の場合は、図 7(b) に示すように同じ乱流格子でも $Re_2=5.61 \times 10^4$ より生成する乱れは大きく、衝突面位置におよぼす影響は前述の $Re_2=5.61 \times 10^4$ の場合より大きく、ノズル 1 出口近傍でもその影響が現れる。また、 $x_s/L > 0.75$ の領域では、図 4, 5 より明らかなように、平均流速の減衰と乱れの増加はレイノルズ数により大きな差はない。したがって、この領域では図 13(a), (b) の比較からレイノルズ数の差による U_1/U_2 の衝突面位置におよぼす影響の違いは明りょうには見られない。

図 14(a) に示すように、ノズル 1 に乱流格子 2 を設けた場合はノズル 1 側の噴流に生成される乱れが大きくなり、 $0.25 < x_s/L < 0.75$ の領域で、衝突面がノズル 1 側

図 11 平均流速と乱れによる $(U^2 - \overline{u^2})/U_1^2$ の変化 ($L/D=4.3$)

図 12 平均流速と乱れによる $(U^2 - \overline{u^2})/U_1^2$ の変化 ($L/D=8.57$)

(a)

(b)

図 13 ノズル 1, 2 出口流速比と衝突面位置 ($L/D=4.3$)

(a)

(b)

図 14 ノズル 1, 2 出口流速比と衝突面位置 ($L/D=4.3$)

(a)

(b)

図 15 ノズル 1, 2 出口流速比と衝突面位置 ($L/D=8.57$)

からノズル 2 側へ大きく移動する際の U_1/U_2 の値は、図 11 に示した乱流格子 1 の場合よりさらに大きい。

図 14(b) に示す $Re_2=8.58 \times 10^4$ の場合は 11 図(a) の $Re_2=5.61 \times 10^4$ の場合より乱流格子により生成される乱れが大きく、 $0.25 < x_s/L < 0.75$ の領域で衝突面がノズル 1 側からノズル 2 側へ移動する際の U_1/U_2 の値は、図 14(a) の場合よりさらに大きくなる。

図 16 噴流軸上の乱れの変化と衝突面位置

7.2 ノズル間距離 $L/D=8.57$ の場合 図 15 に $L/D=8.57$ で、乱流格子 2 をノズル 1 へ設置した場合のノズル 1, 2 出口平均流速比 U_1/U_2 と衝突面位置との関係を示す。

$L/D=8.57$ の場合は、 U_1/U_2 の値のわずかな変化により、衝突面位置が大きく移動する衝突面位置の不安定な領域は $L/D=4.3$ の場合より小さく、 $0.25 < x_s/L < 0.55$ の範囲となる。図 15(a), (b) に示す、ノズル 1 に乱流格子を設置しない場合の $0.25 < x_s/L < 0.55$ の領域では、 $L/D=4.3$ の場合より衝突面位置は U_1/U_2 の値に対して安定して決定される傾向にあり、 U_1/U_2 の x_s/L に対する変化率は $L/D=4.3$ の場合より大きい。

ノズル 1 へ乱流格子 2 を設置した場合、図 15(a) に示す $Re_2=5.61 \times 10^4$ では、図 15(b) に示す $Re_2=8.58 \times 10^4$ の場合より $0.25 < x_s/L < 0.55$ の領域での乱流格子の影響は少なく、この結果は $L/D=4.3$ の場合と同様である。また、ノズル 1 出口近くの $x_s/L < 0.25$ の領域では、図 13, 14 に示す $L/D=4.3$ の場合より乱流格子の影響は顕著である。一方、 $0.55 < x_s/L$ の領域では、図 8, 9 に示されるように、乱流格子による平均流速の減衰と乱れの増加が大きく、式(7)における $U^2 - \overline{u'^2}$ の値は小さくなり平均流速の小さくなったぶんだけ乱れにより衝突面位置は大きく影響を受けると考えられる。

8. 乱れの大きさが衝突面位置におよぼす影響

式(7)で示されるように、対向衝突乱流噴流では、対向する一方の噴流軸上の乱れの大きさにより衝突面位置は変化する。図 16 には噴流の乱れの大きさが衝突面位置におよぼす影響を評価するため、図 13~15 において $x_s/L=0.25$ での乱流格子を設置した場合と、

そうでない場合の U_1/U_2 の値の差を、その際のそれぞれの乱れの大きさの差に対してプロットした。多少測定値にばらつきがあるが、一方の噴流軸上の乱れを増加させると、 U_1/U_2 の値を増加させる必要があることがわかる。ノズル間距離による違いが多少見られるが、 $L/D=4.3$ では噴流のコア領域で衝突し、 $L/D=8.57$ では噴流のコア領域を外れたところで衝突しているため、 U_1/U_2 と乱れの大きさとの関係が多少異なるのではないかと考えられる。

9. 結 論

(1) 対向衝突乱流噴流における衝突面位置は、式(7)で示されるように噴流中心軸上の乱れの x 方向成分の大きさにより影響を受け、平均流速が同じであるなら乱れの大きい側へその位置を変えることを実験

的に明らかにした。

(2) 対向する二つのノズルの一方に乱流格子を設け、一方の噴流のみに大きな乱れを与えると、流れ方向の平均流速と変動流速の変化によっては衝突面位置が二つ定まる場合があることを示した。

文 献

- (1) Katz, S. and Reid, K. N., *ASME Paper*, No. 70-WA/F1cs-2(1970), 283.
- (2) Misevich, K. W., *ASME Publ., Adv. Fluid.*, (1967), 98.
- (3) 牧・小川, 機論, 53-485, B(1987), 82.
- (4) 小川・牧, 機論, 53-492, B(1987), 2384.
- (5) 小川・牧, 機論, 52-473, B(1986), 318.
- (6) Hinze, J. O., *Turbulence*, (1959), 23, McGraw-Hill.
- (7) Abramovich, G. N., *The Theory of Turbulent Jets*, (1963), 43, M. I. T. Press.