〈特別研究課題〉	ヴォルテック	スジェネ	ネレータ	による
	選択的噴流熱拡散制御			
助成研究者	名古屋大学	伊藤	靖仁	



ヴォルテックスジェネレータによる
選択的噴流熱拡散制御
伊藤 靖仁
(名古屋大学)

# Selective Control of Thermal Diffusion in Jet by Vortex Generators

Yasumasa Ito (Nagoya University)

# Abstract :

Effects of vortex generators (VGs) on entrainment and diffusion in a slightly heated axisymmetric jet are experimentally investigated. The VGs are installed circumferentially with an equal interval at the jet exit. The number of the VGs is varied from 1 to 6. The jet Reynolds number is set to 20,000. Instantaneous streamwise and radial (vertical or horizontal) velocities and temperature are mainly measured simultaneously by a composite probe which consists an X-type hot-wire and an I-type cold-wire. The results show that the entrainment of the ambient fluid increases with the number of the VGs near the jet exit. However, in the downstream region, it is the largest in the case with 3 VGs and those in the cases with 4, 5, and 6 VGs are smaller than that in the case without the VG. It is revealed that, compared to the case without the VG, the entrainment velocity represented by the mean velocity gradient is equivalent or smaller in all cases with VGs but the entrainment area is much larger when the entrainment rate is larger, and it is the same level or also smaller when the entrainment rate is smaller. Regarding thermal diffusion, that near the jet exit is more enhanced with increasing the number of the VG but, in the downstream region, it is equivalent or smaller in all cases with the VGs than that in the case without the VG. These characteristics are attributed to the balance of the turbulence energy and mean velocity distribution of the jet, which supposedly represents the interfacial area of the jet.

## 1. はじめに

噴流中における運動量やスカラーの拡散現象は、空気清浄機や冷暖房機といった空調機器、航空 機・ロケットのエンジン、燃焼器内における燃料の噴射等に幅広く見られる.そのため、噴流制御 は工学的に重要な技術課題である.噴流の速度場の制御方法としては、噴流の特性が噴流の出口形 状や境界条件に依存する性質(Xu and Antonia, 2002)を利用し、噴流出口形状の変更(Longmire et al., 1992, Heeb et al., 2014) や出口部へのタブやVG など突起の設置(Bradbury and Khadem, 1975, Rogers and Parekh, 1994, Zaman, 1999)する方法 が挙げられる. 自身の研究グループも過去の研 究(三浦他, 2015)で6つの半デルタ翼形状のボルテックスジェネレータ(VG) を軸対称噴流出口直後 に設置する実験を行い、VG が速度場に与える影響を調査した.その結果、VG は噴流出口直後に おいて噴流の拡散や周囲流体の取り込みを促進させるが、噴流出口の遠方の領域では、平均せん断 応力の減少により乱れの生成および運動量輸送が抑制されるため、周囲流体の取り込み効果が抑制 されることを明らかにした.

一方,噴流のスカラー場にVG が及ぼす影響については,Mi and Nathan (Mi and Nathan, 1999) が加熱軸対称噴流の出口直後に2つあるいは4つのデルタタブが設置された場合のスカラー混合機 構を実験的に調査した.その結果,噴流出口直後において,タブによる周囲流体の噴流内部への巻 き込みにより噴流中心軸上での平均温度が急激に減少する,つまり混合効果が促進されることを明 らかにした.加えて,タブが2 個の場合にはポテンシャルコア領域がタブにより分割されるため, 混合効果がより顕著であることを明らかにした.また,Miら(Mi et al., 2001)は,加熱軸対称噴流 の挙動に及ぼす初期速度分布の影響を実験的に調査した.その結果,円管ノズルは縮流ノズルの場 合と比較してコヒーレント渦輪の発生を抑制するため,噴流中心軸上での平均温度および温度乱れ の減衰率が低下することを明らかにした.

これらのことから、軸対称噴流の初期速度場にVG によるじょう乱を与えた場合にも、スカラー 拡散場に大きな影響を及ぼすと考えられる.また、噴流の拡散・抑制それぞれの目的に応じた最適 なVGの設置方法(個数)があると考えられるが、その設計指針は明らかにされていない.そこで本 研究では、過去の研究(三浦他、2015)で対象とした軸対称噴流場に加熱流体を供給する実験を行 い、VG による噴流制御が乱流熱輸送に及ぼす影響の解明および噴流の制御(拡散、抑制)指針を示 すことを目的とした.

## 2. 実験

2.1 実験装置

図1に実験装置の概略を示す.用いた装置は既往研究(三浦他,2015)と同様であり,送風機,風 洞,および円形スキマーにより構成されている.ただし,加熱噴流を供給するために,送風機の空 気取り入れ口に電熱ヒータを設置した.円形スキマーの直径dは30mmであり,上流側の形状は鋭 利に加工してある.スキマー直径dと噴流出口部における流速U<sub>3</sub>~10m/sから決定される出口レイ ノルズ数Re,は,20,000に設定した.また,噴流出口における流体温度は,周囲流体の温度より7.5 K 高く設定した.座標系は原点をスキマー出口直後の中心点として,主流方向をx,垂直方向をy, スパン方向をzとした.

図1(b) に噴流出口近傍の概略を、内挿図にVGの拡大図を示す. なお図はVGを6個設置した場合

であり,複数のVGを設置する場合にはVGが等間隔になるように配置した. 個々のVG は半デルタ 翼形状の小片であり,最も鋭い角を上流方向に向け,主流方向に対する迎角が30度の状態で設置 されている. VG の突き出し高さhは3.75mm であり,噴流出口直径との比はh/d=0.125 である.

2.2 計測装置

図2に,速度温度計測プローブ部の概略を示す.計測には自作の熱線流速計と冷線温度計をそれ ぞれ使用した.熱線流速計のセンサ部を直径5µm,長さ1 mm,冷線温度計のセンサ部を直径3µm, 長さ2mm のタングステン細線をそれぞれ支持用のプロングにスポット溶接して製作した.速度2 成分(x方向とy方向,またはx方向とz方向)および温度の同時計測の際には,図2 に示されるX 型熱 線プローブおよび冷線プローブを組み合わせた複合プローブを使用した.各プローブのセンサ部中 心のy,z方向座標は一致しているが,物理的干渉を避けるために冷線プローブを熱線プローブのD x = 2.0 mm 上流に設置した.熱線流速計と冷線温度計で得られた電圧信号は,PC (Dell Vostro 200)に搭載されたA/D 変換ボード(National Instruments PCIe-6343)により16bit のデジタル信号 に変換され,コンピュータに記録された.計測時のサンプリング周波数は20kHz,サンプリング時 間は約26秒とした.



図1.実験装置の概略. (a)風洞部, (b)噴流出口近傍およびVG



# 3.実験結果(速度場)

## 3.1 速度分布

図3および4に, x/d=2.0および9.0における主流方向平均流速の断面分布をそれぞれ示す.図3よ

り、上流部ではVGの背後では速度が小さく、VGの谷間では速度が大きいことがわかる.また図4 より、下流に進むと分布は円形に近づくものの、2VGおよび3VGの場合にはVGの影響がまだ残っ ていることがわかる.



3.2 巻き込み流量

各主流方向位置における主流方向平均流速を積分することで,各断面における流量qを算出した. 図5(a)にその主流方向分布を,(b)に各位置において,VG無しの場合に対するVG有の場合の流量の 変化を示す.ただし流量は初期流量q<sub>0</sub>で無次元化されている.

$$q^* = \frac{q}{q_0} = \frac{\int \int U dy dz}{U_J (\pi d^2 / 4)}$$

また、図中の添え字woはVGを設置しなかった場合を、0は初期における値を示す.図より、上流 部ではVGの数が増えるに従がって流量が増大する、すなわち周囲流体の巻き込み量が増大するこ とがわかる.しかし下流に進むとその効果は反転し、下流部においては、VGの数が4つ以上の場 合にはVGを設置しなかった場合よりも流量が小さく、その傾向はVGが6つの場合に最も顕著であ る.一方VGの数が2つまたは3つの場合には、測定範囲においてはVGを設置しなかった場合に比 べて下流域においても流量が大きい結果となった.そこで、以後は3VGおよび6VGの場合につい て考察する.



一般に、せん断流れ場における流体の巻き込み流量は、流体の巻き込み速度の積分値として表さ れる.流体の巻き込みは噴流と周囲流体の乱流非乱流界面において行われるが、本研究で巻き込み 速度およびその定義点を同定は不可能である.そこで、その駆動力は主流方向速度こう配であるこ とを考慮し、噴流の半値幅位置における速度こう配が巻き込み速度を、半値幅の等値線が巻き込み 領域を代表すると仮定し、各場合におけるそれらの値を算出した.図6(a)に断面平均された主流方 向速度こう配の主流方向分布を、図6(b)に半値幅位置における等値線長さの主流方向分布を示す. 図6(a)より、平均速度こう配は上流部からVGを設置した場合の方が小さい、つまり巻き込み速度 は小さいことがわかる.一方図6(b)からわかるように、等値線長さは、6VGの場合には上流部では 長いのに対して、下流部ではVGを設置しなかった場合よりも短い.一方3VGの場合には、上流部 から下流部にかけて全体でVGを設置しなかった場合より長い.また3VG,6VGいずれの場合にも 上流部で一度長さが減少しているが、これはVGにより歪められたポテンシャルコアの断面形状が 円形に近づくことを意味している.これらのことは、巻き込み量は巻き込み速度ではなく巻き込み 領域の大きさに強く依存することを意味する.

## 4. 実験結果(温度場)

パッシブスカラーの混合・拡散に及ぼすVG の影響を定量的に評価するため, y-z平面上の平均 温度分布に基づくエントロピーS を計算した. SはBoltzmannの公式を基に次式で定義される (Everson et al., 1998).

$$S \cong k\Phi \ln \Phi - k \iint \phi \ln \phi dy dz$$

ここでkは定数であり、今回は1とした. また

$$\phi = (\overline{\Theta} - \Theta_a) / (\Theta_J - \Theta_a)$$
$$\Phi = \iint \phi dy dz$$

である. なお、 Θは平均温度を、添え字のJおよびaはそれぞれ初期噴流および周囲流体を示す. こ こでSの左辺第1項は統計エントロピーを、第2項は変動エントロピーと呼ばれ、噴流においては、 統計エントロピーが主体的な役割を示すことが多い. 図7に、全エントロピーの主流方向分布およ び各点におけるVGを設置しなかった場合と設置した場合の比を示す. なおS.は初期エントロピー である. 図7より、スカラー拡散も巻き込み量と同様に、上流部ではVGの設置数が多いほど促進 されるものの、下流ではその効果はむしろ抑制する方向に働くことがわかる. また3VGの場合に も下流域ではVGを設置しなかった場合よりもエントロピーが同程度か小さなことから、スカラー 拡散については、いずれの場合にも下流域では抑制されることがわかる. つまり、出口遠方にス ポット的に熱を輸送したい場合には、多くのVGを設置することが有効であることと言える.

## 5. 数値シミュレーションによる速度場の可視化

実験とほぼ同じ条件において、スーパーコンピュータを用いた直接数値計算を行った。数値解法





図8. 数値シミュレーションによる3次元渦構造の可視化. (a)VG近傍, (b) 流れ場の全体像.

には部分段階法を用い,時間発展にはおもにルンゲクッタ法を用いた.空間差分にはおもに2次中 心差分を用いた.VGにより生成される渦の3次元構造の可視化などを行った.その結果を図8に示 す.図より,VGの背面側では縦渦状の流れが,前面側では偏向流が生成されることがわかる.ま た,この偏向流は半径方向外側に拡散していくことから,これが初期の噴流拡散促進の原因である と考えられる.それらは下流に行くと合流し,さらに下流に行くと噴流自身が作り出す乱れと重ね あわされることが明らかになった.今後は,VGが作る乱れのより詳細な渦構造や熱拡散に及ぼす 影響を明らかにしていく予定である.

# 6. まとめ

本研究では、加熱軸対称噴流の出口に挿入された半デルタ翼形状VGが噴流の流動構造および熱 輸送機構に及ぼす影響を明らかにした.またVGによる噴流の巻き込みや混合・拡散制御(促進や抑 制)のための最適化指針を示すことを試みた.得られたおもな知見は以下のとおりである.

- 複数のVGを設置した場合,噴流出口直後においては,噴流拡散はVGの谷間で促進され背後で は抑制される.噴流出口から離れるにつれて速度および温度統計量の分布形状は軸対称に近づく.しかし、2つのVGおよび3つのVGを設置した場合には、それぞれ楕円形、三角形形状を 比較的下流域まで維持する.
- VGの背後の領域では縦渦が発生するのに対して、VGの前面側ではVGに衝突した流れが偏向 されて、平均速度や平均温度が大きい流体が噴流が半径方向外側に拡散する.
- ・噴流出口近傍の領域では、VGの数が増えるにしたがって周囲流体の巻き込み効果やスカラーの拡散混合効果が促進される。一方噴流出口遠方では、巻き込みは3つのVGを設置した場合に最も促進される。特に6つのVGを設置した場合には逆に抑制され、VGを設置しなかった場合に比べても巻き込み量は小さくなる。
- VGを設置すると空間平均的な巻き込み速度は減少するが、その領域が大きく増大する場合に は、巻き込みが促進される.
- ・空間平均スカラーの拡散混合については、上流ではいずれも促進されたが、下流ではVGを設置した場合にはVGを設置しなかった場合と同程度か抑制される。その効果は特にVGを6つ設置した場合に顕著である。

以上の事から、VGは噴流の熱拡散制御手法として有効であり、設置方法によって促進および抑 制のいずれにも作用させられることが明らかになった.よって、各目的に応じた最適化を行えば、 空調機器などの高効率化・省エネルギー化を実現できると期待できる.

# 参考文献

- G. Xu and R. A. Antonia, Effect of different initial conditions on a turbulent round free jet, Experiments in Fluids, Vol. 33, pp. 677-683, 2002.
- [2] E. K. Longmire, J. K. Eaton and C. J. Elkins, Control of jet structure by crown-shaped nozzles, AIAA Journal, Vol. 30, No. 2, pp. 505-512, 1992.
- [3] N. Heeb, E. Gutmark and K. Kailasanath, An experimental investigation of the flow dynamics of streamwise vortices of various strengths interacting with a supersonic jet, Physics of Fluids, Vol. 26, 086102, 2014.
- [4] L. J. S. Bradbury and A. H. Khadem, The distortion of a jet by tabs, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 70, pp. 801-813, 1975.
- [5] C. B. Rogers and D. E. Parekh, Jet mixing enhancement and noise reduction by streamwise vortices, AIAA Journal, Vol. 32, No. 3, pp. 464-471, 1994.
- [6] K. B. Q. Zaman, M. F. Reeder and M. Samimy, Control of an axisymmetric jet using vortex generator, Physics of Fluids, Vol. 6, No. 2, pp. 778-793, 1994.
- [7] 三浦健介,伊藤靖仁,酒井康彦,岩野耕治,長田孝二,半デルタ翼形状を有するボルテックスジェネレータによる軸対称噴流の制御に関する研究(第1報:速度場の統計量による評価),日本機械学会論文集,Vol. 81, No. 828, 15-00306, 2015.
- [8] J. Mi and G. J. Nathan, Effect of small vortex generator on scalar mixing in the developing region of a turbulent jet, International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 42, pp. 3919-3926, 1999.
- [9] J. Mi, D. S. Nobes and G. J. Nathan, Influence of jet exit conditions on the passive scalar field of an axisymmetric free jet, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 432, pp. 91-125, 2001.
- [10] R. Everson, D. Manin, and L. Sirovich, Quantification of mixing and mixing rate from experimental observations, AIAA Journal, Vol.36, No.2, pp.121-127, 1998.