展望・解説

流れの中の渦とその操作*

豊田 国昭**

Manipulation of Vortices in Flows

Kuniaki TOYODA

1. はじめに

自然界および工学分野の流体運動には多くの渦が見られる^{1)~3)}。レイノルズ数の大きいせん断流では必然的に渦が発生し、流れの諸特性は渦の挙動に支配される。したがって、渦の挙動を把握することは流れを理解し制御する際の有力な手がかりとなり、近年各種流れ場の渦構造を解明する研究が活発に行われている。

渦は可視化が最も有効な情報をもたらす流れ現象であり、その特性は可視化技術の発達により明らかにされてきたと言える。流れの中の渦を可視化するために一般的に用いられている技術は、流れの中に染料や煙を注入し流脈を観察する方法であるが、流脈模様は流れの履歴に影響されるので、下流の可視化画像の解釈には十分な注意を要する。近年、コンピュータを用いた画像処理技術の著しい発達により、流れの中のトレーサ粒子を追跡し流れ場全体の流速分布および渦を測定することが可能になった⁴⁾。この手法では局所的な渦の挙動を明らかにすることが可能で、今後の発展が期待される。

近年注目されている可視化手法は CAFV (Computer Aided Flow Visualization) である。スーパーコンピュータおよび数値計算アルゴリズムの著しい発達により、従来の可視化技術では測定不可能であった渦構造の詳細が明らかにされつつあり、今後、流れ現象解明の手段としてこの手法がますます発展することが期待される。

以上のような可視化技術の発展により渦の挙動

の詳細が明らかにされつつあり、工学的応用に関する研究も数多く行われるようになった。本稿では工学的応用の今後の発展が期待される「渦の操作による流れの制御」を取り上げ、筆者の研究分野である噴流を中心として、基礎流れを対象とした最近の研究動向を展望・解説する。

2. 渦の発生

2.1 噴流⁵⁾

円形ノズルからの噴流中には図1のような周期的渦輪列が発生することはよく知られている。噴出口近傍に発生したせん断層の不安定性により小規模な渦列が形成され、それらの渦列の合体により大規模な渦輪列が生成される⁶⁾。せん断層の不安定性による初期渦列の発生周波数 f_n はストロハル数 $St_n = f_n \theta / U = 0.012$ (θ は境界層の運動量厚さ, U は噴出速度)⁶⁾, $X/D \approx 3$ (X は噴出口からの下流方向距離, D はノズル直径) で生成される大規模渦輪列のストロハル数は $St_D = fD/U = 0.3 \sim 0.5$ である⁷⁾。大規模渦輪列のストロハル数は噴流全体の速度分布によるコラム不安定によるもので、測定で得られる St_D の値は、上流のせん断層不安定による渦列の合体過程、風洞固有の共鳴、噴流外部の暗騒音による励起効果などにより

図1 円形噴流中の渦輪列

*原稿受付 1993年9月9日

**正会員 北海道工業大学

図2 渦輪の崩壊⁹⁾

影響されるために、従来の測定結果では広範囲にわたっているが、信頼できる測定結果によると0.4程度と思われる。

上述のような渦輪構造はいつまでも持続するものでなく、 $X/D=4\sim5$ のポテンシャル領域末端において崩壊する。この崩壊過程の詳細については不明な点が多いが、図2のようなモデル⁹⁾が考えられている。このモデルでは、円形の渦輪構造は円周方向の3次元不安定性により波状に変形し小さな渦に分裂して崩壊する。

2.2 後流

後流中に発生する渦の代表例は、図3のような円柱後方に発生するカルマン渦列である。この渦列については多くの研究が行われており、 $Re = Ud/\nu > 45$ (d は円柱直径、 ν は動粘性係数)で発生することが知られている。このような渦列は流れに平行に置かれた平板の後流にも発生するが、この場合には、物体から流れが剝離する結果ではなく、後流の不安定性により渦列が発生する。

2.3 境界層

層流境界層が乱流に移移する過程で渦が発生する。あるレイノルズ数以上で層流境界層中には Tollmien-Schlichting 波が発生し、これが成長しいわゆるヘアピン渦が形成され乱流斑点が成長し乱流境界層へと遷移する⁹⁾。このように遷移過程では顕著な渦構造が観察されているが、乱流境界層中の渦構造も近年の研究により明らかにされつつある。乱流境界層中の組織的渦構造が Klein¹⁰⁾ によって見いだされ、その後、計測・データ処理技術の発達にともないこの構造の詳細が明らかに

図3 カルマン渦列

図4 乱流境界層中の渦構造¹⁰⁾

された¹⁰⁾。これらの結果によると、乱流境界層中の組織的渦構造は主に図4のような馬蹄形の渦で特徴づけられ、この渦による誘起速度場がバースト現象に関連している¹⁰⁾。これらの構造はスーパーコンピュータによる数値計算によりさらに明らかにされつつあり¹¹⁾、その結果によると馬蹄形の片側に相当するフック形状の渦も多数存在する。

以上のように流れの中には顕著な渦が存在し、これらの渦の挙動が流れの諸特性を支配していることが明らかにされている。したがって、これらの渦を操作することにより流れを効果的に制御することが可能と思われる。次節で渦の操作法の例を解説する。

3. 渦の操作による流れの制御

3.1 噴流

噴流中の渦の操作法の代表的なものはスピーカからの音波による励起効果を利用するものである。これは流れの不安定性に基づく特定の周波数の音波により渦の発達を操作するものである。

渦の操作により流れを制御し噴流騒音を低減した例¹²⁾を以下に述べる。マッハ数 $M=0.15$ の円形噴流をノズル出口でスピーカからの音波により励起し、噴出口から発生する混合層中に形成される渦が操作され、騒音測定が噴出口から $57D$ の位置で噴流軸に対する放射角 $\alpha=45^\circ\sim105^\circ$ の範囲で行われた。励起ストロハル数 $St_{\theta} = f_{\theta} \theta / U$ (f_{θ} は励起周波数)と騒音レベルの関係を図5に示す。図では騒音レベルが励起なしの場合との差で示されている。騒音レベルは、 $0.01 < St_{\theta} < 0.02$ の範囲で減少しているが、これは、混合層中に形成される渦の成長が早期に飽和状態になり崩壊するために、下流の合体による大規模渦の発達が抑制されたためである。また、 $0.004 < St_{\theta} < 0.009$ の低周波数励起では渦の合体が促進され、

図5 励起による噴流騒音の低減¹²⁾

その結果乱れが強くなり騒音が大きくなる。このような渦構造と騒音レベルとの関係は、流れの詳細な測定結果により確認されている。以上の結果は渦の操作による流れの制御が騒音減少に効果的であることを示している。

渦の操作は流れを一定の周波数で励起することにより行われることが多いが、近年注目されている方法は異なった周波数を持つ二つの周期波を合成した攪乱により励起するもので、乱れ強さは二つの周期波間の位相差 ϕ に著しく影響される。風洞内に設けたスピーカに合成波を入力して円形噴流を励起した場合の、乱れ強さにおよぼす位相差の影響を図6に示す¹³⁾。合成波としては噴出口近傍混合層の自然振動数 f_n とその半分 $f_n/2$ の周波数を持つ周期波を加えた波

$$e = A \cos(2\pi f_n t)$$

図6 合成波攪乱による乱れ強さ¹³⁾

$$+ B \cos\{2\pi(f_n/2)t + \phi\}$$

$$A = B, f_n = 145 \text{ Hz}$$

を用いている。興味あることは、 $\phi = 90^\circ$ で流れ方向乱れ強さ (u') が急激に減少することである。流れの中の渦の挙動を調べると、 $\phi = 90^\circ$ では合体による渦構造の成長が抑制されている。また、この状態では乱れ強さは励起なしの場合より減少しており、騒音および混合減少効果が期待される。この現象については、混合制御を目的とした実験的研究¹⁴⁾、数値シミュレーションによる渦の干渉挙動の研究¹⁵⁾も行われており、今後の研究の発展および工学的応用が期待される。

近年注目されている渦構造の他の操作法として非円形噴流によるものがある。これは噴流中の非円形渦の3次元変形を利用するもので、とくに混合促進効果を目的として研究されている。

楕円噴流中の渦の挙動については、Hussainら¹⁶⁾により詳細に研究されている。アスペクト比 $AR=2$ の噴流中に生成される楕円渦は、自己誘起速度が曲率半径に反比例するので、図7に示すように長軸の渦部は短軸の前方かつ渦中心方向に移動し、このために短軸の渦部では曲率が大きくなり自己誘起速度により外側方向に移動する。その結果、渦の長短軸が入れ替わることになる。 $AR=4$ の楕円噴流中の渦は長短軸が入れ替わった後に渦部が接触し切断・再結合により図8のように分裂する。以上のような渦の変形および小規模渦への分裂は、噴流内外部間の流体輸送を促進し接触

図7 楕円渦の変形 ($AR=2$)¹⁶⁾ 図8 楕円渦の変形 ($AR=4$)¹⁶⁾

面積を著しく増大するので、拡散・混合を促進することになる。

楕円噴流のような非円形噴流の拡散促進効果は渦の3次元変形に依存しているので、鋭い角部を有する非円形噴流中では、さらに激しい渦の3次元変形により著しい拡散促進効果が期待される。以下に、著者らの行った正方形、三角形、長方形 ($AR=2, 4$) のオリフィスからの水噴流についての可視化実験結果¹⁷⁾を紹介する。この実験では、レーザ光により流れを可視化するために、蛍光染料 (ウラニン) がオリフィス噴出口周辺の細い溝部から流れに注入され、噴流は上流のオーバーフロータンクに設けられた加振器により励起され、噴流中の渦が安定化されている。オリフィス噴出口の平均速度は 2.9cm/s 、噴出口等価直径 De に基づくレイノルズ数 $Re=UDe/\nu$ は 1.5×10^3 である。

噴出口からのせん断層の巻き上がりにより生成された小規模渦列は低周波数 $f_e=f_n/8$ (f_n はせん断層の自然振動数) の励起により合体し、安定した大規模渦が生成される。このようにして生成

された大規模渦は十分下流まで隣の渦と干渉することなく変形する。正方形噴流断面の可視化結果を図9に示す。渦の自己誘起速度の影響により、角部と辺部が入れ替わるように変形していることが分かる。可視化画像の解析により得られた非円形渦の変形模様を図10に示す。これらの変形は静止流体中に噴出された非円形単一渦輪の場合¹⁸⁾と同様である。

噴流を $f_e=f_n/4$ で励起すると、噴出口直後で生成された非円形合体渦は下流で二つずつ干渉する。可視化画像の解析から得られた噴流中の渦の干渉模様を図11に示す。図中の太線は先行渦を2重線は追跡渦を表している。正方形噴流中の干渉では、先行渦は単一渦輪の場合と同様に変形し垂直軸と対角軸が入れ替わり、追跡渦は変形しながら先行渦の中に入り込む。その後、二つの渦は部分的に合体し、追跡渦の追い抜き部は噴流中心付近の高速流に輸送されて下流方向に引き伸ばされ、先行渦は上流外側方向に引き伸ばされる。この干渉の結果、二つの渦は著しく変形し流れ方向の渦構造が形成される。この流れ方向の渦構造は

(a) $X/D=1/4$ (b) $X/D=1/2$ (c) $X/D=3/2$

図9 正方形噴流中の渦の可視化 (口絵1参照)

(a) 正方形噴流

(b) 三角形噴流

(c) 長方形噴流 ($AR=2$)(d) 長方形噴流 ($AR=4$)図10 非円形噴流中の渦の変形¹⁷⁾

図11 非円形噴流中の渦の干渉¹⁷⁾

噴流内外部間の流体輸送を促進するので拡散の増大に寄与する。

三角形噴流中でも渦の部分的な合体と著しい伸長が見られる。アスペクト比2の長方形噴流では部分的な合体と追い抜きの後に渦の切断・再結合により渦の分裂が見られる。アスペクト比4の噴流では、先行渦は大きな曲率の効果により急激に変形し、追跡渦は先行渦による誘起速度の影響を受けて変形し噴流中心部で接触し二つの渦輪に分裂する。

以上のような渦の変形・分裂は噴流の拡散・混合を促進することが期待される。 $Re=1.3 \times 10^4$ の空気噴流における噴流断面積の流れ方向変化の測定結果²²⁾を図12に示す。図中の $A_{0.2}$ は噴流中心速度に対する速度比が0.2以上となる噴流部の面積、 A_e は噴出口面積である。図より、円形噴

流と比べて非円形噴流断面積が著しく増大することが分かる。とくに、長方形噴流の場合の断面積の増大が著しい。これは、長方形噴流中の渦の干渉の際に生ずる渦の伸長と分裂がエントレンメントを著しく促進するためと思われる。

3.2 後流

円柱後流などに発生する渦列は物体振動および騒音の原因となり、これらの渦列の発生を抑制することが工学的に重要な問題となっている。渦列発生抑止策としては、物体後方にスプリッタ板を取り付けてカルマン渦列の放出を防止する、ワイヤをらせん状に巻いて周期的渦放出を崩壊するなどの方法が知られている³⁾。物体からの渦放出の抑制には流れの剝離を防止することが必要となるが、近年注目されている手法として図13のように円柱の近くに小円柱を置く方法¹⁹⁾があり、抵抗減少対策として注目されている。

図12 噴流断面積の変化²²⁾ 図13 小円柱による剝離防止策¹⁹⁾

図14 Large Eddy Break-Up Device (LEBU)

図15 リブレット (Riblet)

3.3 境界層

乱流境界層による抗力および騒音の発生は渦構造に深く関連していると予想されるので、渦の操作により制御されることが期待される。渦構造の研究は、とくに抵抗減少を目的として近年活発に行われている²⁰⁾。各種手法の中で注目されているものに、境界層の外層領域に存在する大規模渦を崩壊させるために流れに平行に平板または翼 (LEBU: Large Eddy Break-Up Device, 図14) を挿入する方法がある。また, Riblet (図15) も摩擦抵抗低減法として注目されている²¹⁾。この場合にも渦の操作効果が抵抗低減に寄与しているものと思われるが、その機構の詳細については不明な点が多い。

4. おわりに

基礎的流れに発生する渦とその操作法について、筆者の研究分野の噴流を中心に解説した。渦の操作法については、とくに工学的応用に重点を置いていくつかの事例を紹介した。これらの事例から明らかなように、流れを制御するためには渦の操作が極めて有効であることが分かる。流れの中の渦を操作するためには、まず問題となる流れの渦構造の特徴を的確にとらえることが必要であり、その上で渦の操作を行うことにより流れを効率よく制御することが可能と思われる。

本特集号の主旨である「渦の工学的応用」は広範囲にわたっており、応用分野の詳細については参考文献^{1)~3)}を参照していただきたい。

参考文献

- 1) Lugt, H. J. (大橋, 山口訳): 渦—自然の渦と工学における渦 (1988) 朝倉書店
- 2) 小川: 渦学 (1981) 山海堂
- 3) 鬼頭: 渦 (1964) コロナ社
- 4) 西野, 笠木: 三次元画像処理流速計による二次元チャネル

- 乱流の乱流統計量の測定, 日本機械学会論文集 (B), 56-525 (1990) 1388-1347
- 5) 木谷, 井上: 乱れと波の非線形現象 (1992) 朝倉書店, 160-178
- 6) Hussain, A. K. M. F.: Coherent Structures and Turbulence, *J. Fluid Mech.*, 173 (1986) 303-356
- 7) Hayakawa, M. et al.: The Near Field of a Fully Turbulent Circular Jets, *Phys. Fluids*, 58-132 (1985) 3703-3704
- 8) 巽ほか: 乱流現象の科学 (1985) 東京大学出版会, 304-310
- 9) Klein, S. J. et al.: The Structure of Turbulent Boundary Layers, *J. Fluid Mech.*, 30 (1967) 741-773
- 10) Robinson S. K.: Coherent Motions in the Turbulent Boundary Layer, *Annual Review of fluid Mechanics*, 23 (1991) 601-639
- 11) Rjbinson, S. K.: A Review of Vortex Strutures and Associated Coherent Motions in Turbulent Boundary Layers, *Structure of Turbulence and Drag Reduction* (Gyr A., ed., 1990) 23-50, Springer-Verlag
- 12) Hussain, A. K. M. F. and Hasan, M. A. Z.: Turbulence Suppression in Free Turbulent Shear Flows under Controlled Excitation. Part 2. Jet Noise Rebuuction, *J. Fluid Mech.*, 150 (1985) 159-168
- 13) 豊田: バイモーダル励起による円形噴流の制御, 第23回乱流シンポジウム講演論文集 (1991) 370-374
- 14) Raman, G. and Rice, E. J.: Axisymmetric Jet Forced by Fundamental and Subharmonic Tones, *AIAA J.*, 29-6 (1991) 1114-1122
- 15) Inoue, O. Double-Frequency Forcing on Spatial Growing Mixing Layers, *J. Fluid Mech.*, 234 (1992) 553-581
- 16) Hussain, F. and Husain, H. S.: Elliptic Jets. Part 1. Characteristics of Unexcited and Excited Jets, *J. Fluid Mech.*, 208 (1989) 257-320
- 17) 豊田, Hussain, F.: 非円形噴流中の渦構造に関する研究, 日本機械学会論文集 (B), 55-514 (1989) 1542-1545
- 18) Toyoda, K. and Hussain, F.: Dynamics of Noncircular Vortex Rings, *Memoirs of Hokkaido Institute of Technology*, 17 (1989) 1-5
- 19) Strykowski, P. J. and Sreenivasan, K. R.: On the Formation and Suppression of Vortex Shedding at Low Reynolds Number, *J. Fluid Mech.*, 218 (1990) 71-107
- 20) 笠木: 乱流現象の制御—その展望—, 日本機械学会セミナー教材, No. 920-75, 1-10
- 21) Choi, K. S.: リブレット—表面粗さによる乱流摩擦抵抗の減少方法—, 日本機械学会誌, 95-888 (1991) 1013-1018
- 22) 豊田, 白浜, 小谷: 渦構造の操作による非円形噴流の制御に関する研究, 日本機械学会論文集 (B), 58-545 (1992) 7-13

(a) $X/D=1/4$

(b) $X/D=1/2$

(c) $X/D=3/2$

口絵1 正方形噴流中の渦の可視化

(北海道工業大学 豊田国昭) (本文219頁参照)