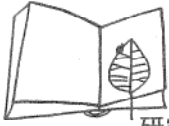


乱流の制御



研究ノート

三宅 裕*

Control of Turbulent Flows

Key Words : Near Wall Turbulence, Control of Turbulence, Numerical Simulation, Coherent Structure of Turbulence

1. はじめに

乱流制御は乱流研究の究極の目的である。乱れと乱流の研究は新しいツールの出現によって何度か大きな発展期を経験したが、大規模数値シミュレーションの出現はこの究極の目標に大きな手がかりを与えようとしている。

乱流制御は壁面乱流の抗力低減 (Drag Control), 剥離制御, 混合層, 後流, 噴流の剪断層の発達過程の制御などがあるが¹⁾, 既に多岐にわたる研究の蓄積がある。とくに, 剥離制御は実験的研究を中心に極めて豊富な知見が得られていて流れの制御に活かされている。航空機翼の高揚力装置はその最も顕著な実用例であろう。

一方, Drag Control は壁乱流の構造制御に基づくものであり, LEBU (壁近傍に壁と平行な小平板を置いて渦の活動を抑える方法) など乱れ構造の巨視的理解に基づいた成功例もあるが, トムズ効果のような乱れの微細構造の修正による有効な手段はまだない。トムズ効果²⁾は実験的に偶然に発見されたもので, Active な制御を目指すものではないが, 大規模数値シミュ

レーションによる乱れ場の詳細な時空間フィールド情報が得られるようになった今日, 微視的構造制御による Active Drag Control の可能性について期待がもたれるようになってきた。ここでは話題をこの問題に限定する。

2. 壁面操作による壁面乱流の修正

壁乱流では渦は壁面上で生成され粘性によって拡散されて壁面から離脱する。壁の極く近傍では渦度は壁に平行な面内ではほぼ一様に分布し渦面を形成するが, 上方に向かって拡散する過程で渦度は局所的に集中し渦糸を形成する。壁近くではレイノルズ数が小さく渦構造は離散的で平均流れ場の変化のスケールに比べて寸法が大きく, いわゆる大規模構造を作る。無次元距離 $y^+ = yu_\tau/\nu$ (y : 壁からの距離, u_τ : 摩擦速度, ν : 動粘性係数) が 10 程度以下では独自の渦構造はなく, 流れの変動はそれより上方の乱れの渦構造が作る変動の粘性波によって作られるが, それより上方で生まれる大規模構造は乱れの様々な現象を支配する。とくにほぼ平均流の方向に軸を持つ縦渦は乱れの維持機構に支配的な役割を果たす。摩擦抗力の低減に限定的ではあるが効果が認められているリブレット³⁾は機構が十分解明されているとは言えないが, 縦渦の作用を低下させるものと推測されていて, 縦渦の乱れの維持に対する役割の大きさを示唆するものと考えられている。

そこで, 壁乱流の制御のための最も有効な手段として縦渦の制御の試みに関心が集まっている。

* Yutaka MIYAKE
1938年9月19日生
昭和36年(1961年)大阪大学工学部
機械工学科卒業
現在, 大阪大学工学部機械工学科,
教授, 工学博士, 流体工学
TEL 06-879-7248
FAX 06-879-7250
E-Mail miyake@fluid.mech.
eng.osaka-u.ac.jp



壁を流れに直交する方向すなわちスパン方向に振動させたときまたはスパン方向の交番平均流を加えたとき大幅な摩擦抗力 τ_w の低下が得られることが指摘されている⁴⁾。図1は流路幅が H の溝乱流で、平均摩擦速度 \bar{u}_τ を代表速度とするレイノルズ数を $Re_\tau = H\bar{u}_\tau/\nu = 300$ とした場合で、一方の壁を静止壁とし、他方をスパン方向に $W_{wall} = 0.8(Q/H)\sin nt$ (Q : 平均流量, n : 角周波数) で振動させた場合である⁵⁾。振動周期 T_{osc} によってその効果は大きく変化するが、図1の $T_{osc}^+ = T_{osc}\nu/\bar{u}_\tau^2 = 100$ 程度するとき

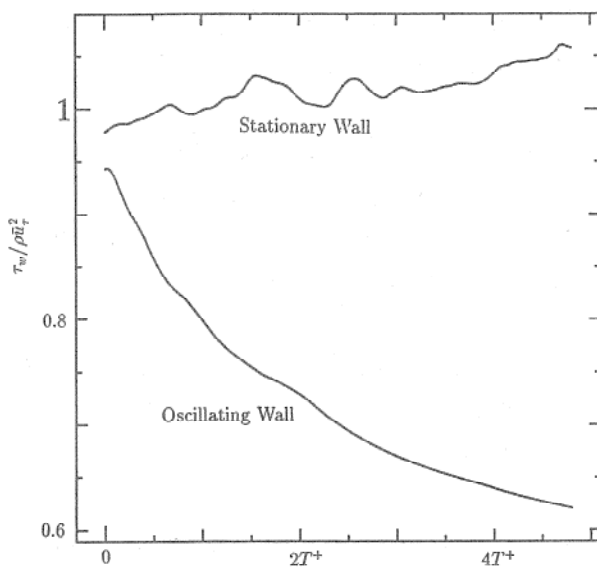


図1 壁のスパン方向振動による壁面摩擦応力の低減

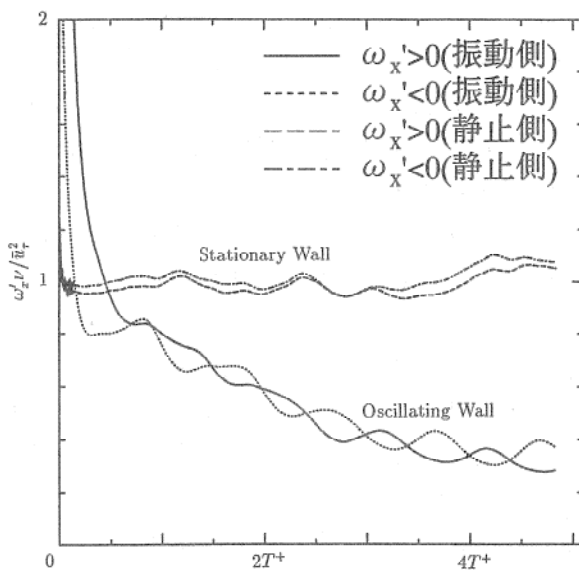


図2 壁のスパン方向振動に伴う縦渦の渦度の減衰経過

最も抵抗減少効果が大きく約35%になる。このときの縦渦の強さの時間変化を調べると図2の様になる。

図2は振動壁側の流路半幅の領域で縦渦の渦度 ω_x を流れに直交する断面内で積分した値を示すもので、 $\omega_x > 0$ と $\omega_x < 0$ に分けて示している。壁面摩擦応力の変化と縦渦の強さの変化はほぼ同期しており、縦渦の役割がわかる。また、回転の異なる縦渦の減衰過程は位相が振動の位相に対して π だけずれており、壁の振動の効果が縦渦の一方の回転の抑制に寄与していることがわかる。スパン方向の壁振動の最適周期 $T_{osc} = 100\nu/\bar{u}_\tau^2$ はストークス層の厚さ $l_s = \sqrt{2\nu/n}$ に直すと壁指標で $l_s^+ = l_s\bar{u}_\tau/\nu \sim 5$ となり、粘性低層内である。そこには独自の渦構造はないから壁の振動は粘性波によって上方の縦渦の底面に弱い干渉を与えているにすぎない。したがって、縦渦の制御は極く薄い粘性低層内の強い渦層の渦糸への凝縮の制御に他ならないことがわかる。

なお、スパン方向の壁面振動による摩擦抗力の低下は、捻れ境界層のDNSにおいて、流れに直交する圧力勾配を突然課したとき一時的に摩擦抗力の低下が生じる結果が得られたことから発見されたもので⁶⁾、数値シミュレーションの成果の一つである。また、このような摩擦低減は最近実験によっても確認されている⁷⁾。

このような個々の縦渦を制御することができれば複雑な壁面の縦渦制御も可能になり、壁面での一様な渦操作が単純な形状の壁面に限られることに比べて汎用性が高い。

壁乱流の乱れの維持に支配的な役割をもつ壁近傍の縦渦の、代表的な寸法は、 $|\omega_1^+| = |\omega_1/(\nu/\bar{u}_\tau^2)| \geq 0.2$ の等渦度面の寸法で計ると流れ方向に $l^+ \sim 200$ 程度、直径は $d^+ \sim 20$ 程度で、平均流速が 15 m/s 程度の平行平板間の空気流では長さが 10 ~ 15 mm 程度になる。流れの制御にはこのような微少な縦渦の挙動とそれが作る流れ場の把握が必要になる。

3. 縦渦の再生

筆者らは縦渦の制御の技術を開発するために縦渦の生成消滅の機構の解明を進めている。

縦渦の生成の過程はまだ明らかでない。幾つかの過程があり得て、それらの内いずれが最も頻繁で重要であるかは分からない。しかし、縦渦の多くは既存の渦自身によって自立的に再生し続けるらしい。筆者らが調べた縦渦の再生過程の一つの概略を述べる⁸⁾。

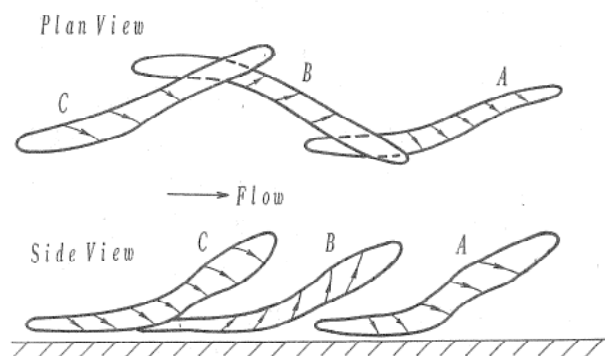


図3 壁近傍乱流の縦渦の配列の基本構造

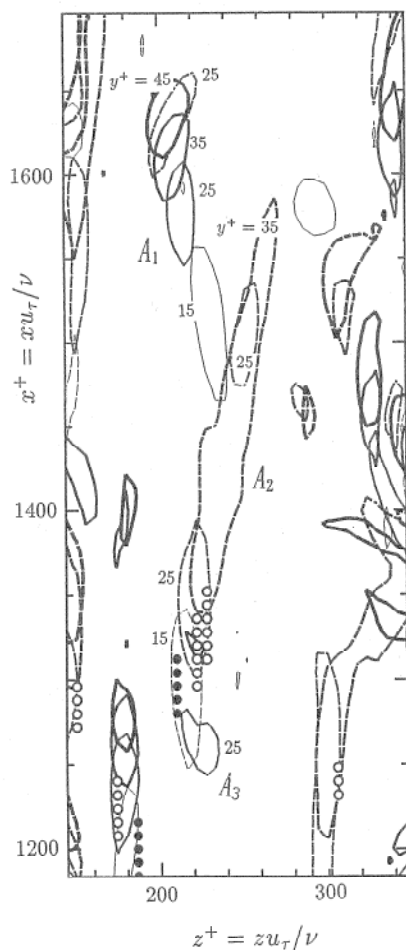


図4 壁近傍乱流の縦渦の再生 ($|\omega_x^+| = 0.2$ の輪郭線, 図中の数字は輪郭線のある面の壁からの距離 $y^+ = y\bar{u}_\tau/\nu$ を示す。また, 白丸は強い吹き上げ流れの点, 黒丸は吹き下ろし.)

壁に近い点で強い吹き下ろし速度 v を検出信号に用いて縦渦を検出すると図3のような渦構造が得られる。縦渦は流れの方向にはほぼ直線に並び一つ一つの渦糸は流れに対して僅かに傾斜している。渦糸は並びの順に回転の異なる渦度をもっており、形状をゆっくり変えながら流下する。この構造は検出点の壁からの高さ y^+ を変えても大きくは変わらない。 $y^+ = 15$ の位置で検出すると壁近くの渦糸前縁付近で渦を捉えることになるが、図4に示すように上流渦 A_2 の上流端上方に新しい縦渦 A_3 が発生し、これが時間と共に成長する。したがって、図3のジグザグの並びは時間と共に流下しながら下流側が減衰し上流側で生成して上流に向かって再生する。

一方、 $y^+ = 35$ で同様に検出すると高い位置の縦渦が検出される。この場合も図3のようなジグザグの縦渦対が得られ、新しい渦糸の生成が起きるが、生成は親渦の下流端の下方で生じる。この結果先と同様に渦対に再生が起きることになる。渦度生成率の時間発展を調べると先の上流端側での生成に比べて弱く、縦渦再生は上流端での再生の方がより多いことが示唆される。

成熟した縦渦は壁面近くの粘性低層内の層状のスパン方向渦を自身が作る回転流れ場によって自身の渦糸中へ巻き込み、壁近くの強い速度勾配によって流れ方向に強く引き伸ばす作用によってその渦度 ω_x を維持する。壁近傍は粘性の作用が強いので渦度の粘性拡散が強く、渦糸の伸びによる渦度生成と釣り合い $\Delta t^+ = \Delta t \hat{u}_\tau^2 / \nu \sim 70$ 程度の寿命時間を保つ。つまり縦渦は自律的な維持機構をもっている。

一方、図4の上流側に再生する縦渦は親渦が作る回転運動によって親渦上方に発生する低速流れ域に起源がある。このようにして生じた低速域の周辺には強いせん断層があり、強いスパン方向の渦度がある。この渦層が作る回転が縦渦を生成して行く。つまり渦度生成の三つの原因の内の Tilting と呼ばれる作用が強い。この場合も縦渦の生成は親渦が作る流れ場に起因していて自律的である。

前節に述べた壁振動による縦渦の制御はこれ

らの自律機構を破壊する効果によっている。そしてこれらの渦再生過程では新しい縦渦の生成の初期に抑制することが有効である。

4. おわりに

計算機シミュレーションは実験的には得られない膨大な高解像度の時空間フィールド情報を提供する。これらは一見ランダムノイズに見える流れ場の変動の時空間の力学的構造を解きあかす手がかりを与え、乱れの制御に道を開こうとしている。ここにはその研究の一端を述べたが、急速な進展が期待される。

文 献

- 1) Euromech Colloquium 328, Books of Abstracts (1994)
- 2) Hoyt, J. W., *Trans. ASME*, ser. D, 94-2 (1972), p.258
- 3) Choi, H., Moin, P., Kim, J., *J. Fluid Mech.*, 255 (1993), p.503.
- 4) Jung, W. J., Mangiavacchi, N., Akhavan, R., *Phys. Fluids*, A4-8 (1992), p.1605.
- 5) 高橋, 三宅, 辻本, 日本機械学会講演論文集 No.940-53 (1994), p.363.
- 6) Moin, P., Shih, T., Driver, D, Mansour, N., *Phys. Fluids*, A2-10 (1990), p.1846.
- 7) Laadhari, F., Skandaji, L., Morel, R., *Phys. Fluids*, 6-10 (1994), p.3218.
- 8) 三宅, 宇城, 森川, 日本機械学会論文集B編 61-584 (1995), pp.1272.

