Japan Society of Fluid Mechanics

日本流体力学会　年会2002
E 123

管内乱流抵抗低減のためのフィードバック制御の直接数値シミュレーション

DNS of Feedback Control for Drag Reduction in Turbulent Pipe Flow

○深潟　康二（東大工，産総研），笠木　伸英（東大工）

Koji FUKAGATA*,** and Nobuhide KASAGI*

* Department of Mechanical Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

** Institute for Energy Utilization, AIST, 1-2 Namiki, Tsukuba-shi, 305-8564 Ibaraki, Japan

Active feedback control of turbulent pipe flow is studied by means of direct numerical simulation (DNS). The active cancellation control scheme proposed by Choi et al. (1994) is tested in the DNS of turbulent pipe flow at low Reynolds numbers. The drag reduction rate attained is found to be almost the same as in the case of turbulent channel flow. Then, the control is applied only partially over a limited length in the streamwise direction. Although the local skin friction has a complex distribution, the total drag reduction rate is almost proportional to the ratio of control length to the total length.

1. 緒言

乱流のアクティブ・フィードバック制御は，近年の制御理論，マイクロマシン (MEMS) 技術，及びコンピュータの処理能力等のめざましい発展により，その実現へ向けて再び注目を集めている [1] が，システムの構成要素のうちコントローラの動作を決定する制御アルゴリズムの開発・検証には直接数値シミュレーション (DNS) が効果的に用いられている．

壁乱流の抵抗低減のための乱流構造規範型アルゴリズムとしては，Choi ら [2] によってアクティブ・キャンセレーション制御 (v 制御) が提案され，チャネル乱流の DNS における壁面摩擦抵抗が約 25%低減することで注目を集めた．アクティブ・キャンセレーション制御では壁面から離れた位置での速度情報を検知する等，理想化された体系を仮定しているが，その後の DNS を用いた研究 [3)-5)] により，より現実に近い条件においても，その基本的な戦略は通用することが示されている．

しかし，チャネル乱流と並ぶ標準的な流れである円管内乱流では上記のような壁面フィードバック制御の研究は行われていない．その一因として，チャネル流に比べ円管流の直接数値シミュレーションが困難であったことが挙げられるが，円筒座標系におけるエネルギー保存性の高いスキームや高精度の特異点の処理法の開発により，その困難は取り除かれつつある．一方，円管内乱流制御の研究の必要性はガスパイプラインにおける抵抗低減等，直接の応用分野があることからも大きい．

そこで本研究では壁面摩擦抵抗低減を目的として，アクティブ・キャンセレーション制御アルゴリズムを適用した円管内乱流の DNS を行う．まず，管壁全体に制御を加えた場合の制御効果をチャネル流の結果との比較により検証する．また，円管の一部区間のみに制御を加えた場合の計算を行い，制御効果の空間的変化について考察する．

2. 直接数値シミュレーション

本研究のために円筒座標スタガード格子系エネルギー保存二次中心差分法 [6] に基づく DNS コードを開発した．時間積分法としては移流項及び拡散項の 1 階微分項に 3 次省メモリ型ルンゲ・クッタ法，拡散項の 2 階微分項にクランク・ニコルソン法を用い，速度・圧力カップリングに Δ 型フラクショナル・ステップ法を用いた．解析対象としては無限に長い円管を想定し，計算領域としては図 1 に示すように周期 L の周期境界条件を課した有限長円管を用い，流量一定条件を課した．計算に用いたレイノルズ数，計算領域長及び格子解像度を表 1 に示す．

抵抗低減制御のための標準的なアルゴリズムとしては上記のアクティブ・キャンセレーション制御 [2] を取り上げ，これを円管流に適用する．この制御では図 2 に示すように壁面近傍の縦渦 (QSV) を打ち消すような制御入力を壁からの吹き出し・吸い込みにより与える．制御入力は，壁から距離 y_d 離れた場所に仮想検知面を設定し，そこで検知される壁垂直方向速度を用いて

$$u_r(0,\ \theta,\ z,\ t) = -u_r(R - y_d,\ \theta,\ z,\ t) \tag{1}$$

とする．

Table 1 Computational condition (sub- and superscripts of u denote the uncontrolled flow)

	$Re_{\tau u}$	L	Δr^{+u}	$(R\Delta\theta)^{+u}$	Δz^{+u}
Case 1a	180	$20R$	0.46 - 2.99	8.84	7.03
Case 1b	184	$20R$	0.97 - 6.25	9.03	14.38
Case 2	110	$35R$	0.43 - 2.74	5.40	15.04

3. 全面に制御を加えた場合の制御効果

非制御時の完全発達流を初期場とし，時刻 $t = 0$ において制御を加えた後の壁面摩擦係数 C_f の時間変化における傾向はチャネル流の場合 [2] と定性的に同じであり，約 1000-2000 粘性時間で統計的定常状態となった．以降では制御開始後約 2000 粘性時間以降の統計量を示す．統計量の積算時間は約 1000 粘性時間である．検知面位置 y_d^{+u} (添字 u は非制御時の粘性スケールを表す) と平均抵抗低減率

$$R_D = \frac{C_{f0} - C_f}{C_{f0}} \tag{2}$$

の関係を図 3 にまとめる．ここに C_{f0} は制御を加えない場合

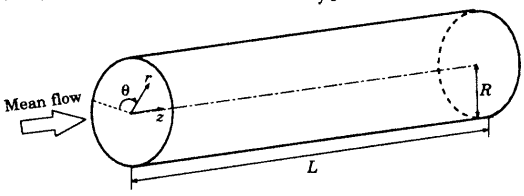

Figure 1 Computational domain.

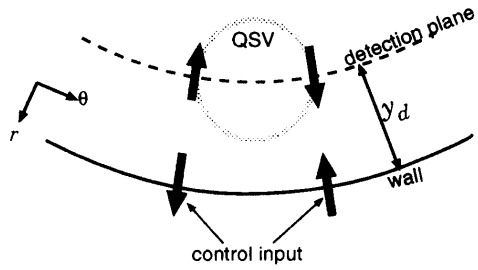

Figure 2 Active cancellation.

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Fluid Mechanics

の壁面摩擦係数，C_f は被制御場の壁面摩擦係数である．チャネル流のデータとしては，$Re_{\tau u} \simeq 110$ のケースでは Choi ら[2] の時間変化のグラフより計算，$Re_{\tau u} \simeq 180$ のケースでは Choi ら[2] ($y_d^{+u} \simeq 10$) 及び Hammond ら[7] ($y_d^{+u} \simeq 15$) に記述されている値を用いた．本研究における円管流でも，チャネルの結果と同様の傾向が見られ，検知面位置を $y_d^{+u} \simeq 15$ とした場合に最大平均抵抗低減率 (約 25 %) が得られた．より高い検知面位置では抵抗低減率は減少し，特に $y_d^{+u} > 25$ の場合には非制御時に比べて抵抗は増加した．これは図 4 に示すように，検知面位置が高すぎる場合にはいわゆる仮想壁面 (virtual wall)[7] の形成が弱くなること，及び壁近傍のレイノルズ応力が増大することによる．また，粗い格子を用いた計算 (Case 1b) や異なるレイノルズ数 (Case 2) でもほぼ同様の結果である．

4. 一部区間のみに制御を加えた場合の制御効果

ここでは周期計算領域のうち $0 < z < L_c$ にのみ前節と同様の壁面制御を加え，残りの区間 ($L_c < z < L$) は非制御，即ち滑りなし境界条件を適用した場合の結果を示す．計算格子解像度は前節 Case 1b と同様，また計算領域長は $L = 20\,R$ 及び $L = 40\,R$ とし，検知面位置は $y_d^{+u} = 10$ に固定した．

図 5 に全面制御における抵抗低減率 R_{D1} で規格化した抵抗低減率 R_D を L_c の関数として示すが，これより抵抗低減率は制御区間の占める割合 L_c/L にほぼ比例することが分かる．周期 $L = 40R$ の場合の局所壁面摩擦係数 C_f の流れ方向分布を図 6 に示す．$L_c^{+u} \leq 4600$ の場合には，制御開始点から終了点までの C_f はほぼ同一の曲線上を辿る．$L_c^{+u} > 4600$ の場合にはこの曲線から外れるが，これは非制御区間が短く，非制御時の C_f まで回復しないためである．制御終了点から約 100 粘性長さ下流までの範囲では C_f の急回復が見られるが，これは壁近傍でのレイノルズ応力分布の急回復による[8]．また，急回復領域より下流ではほぼ線形に回復する．

図 5 に示した，全体としての抵抗低減効果は制御長さ割合にほぼ比例という関係は，このような複雑な C_f の変化の結果として現れている．これは，一部区間のみの制御においても，制御入力の強度を流れ方向に変化させる等，制御アルゴリズムを工夫することにより，さらなる効果が得られる可能性を示している．

5. 結言

円管内乱流にアクティブ・キャンセレーション制御を施した場合の直接数値シミュレーションを行い，以下の基本的知見を得た．

1. 抵抗低減率の仮想検知面位置 y_d への依存性は，チャネル流の場合と同様の傾向であり，$y_d^{+u} \simeq 15$ の場合に最大抵抗低減率，約 25 % が得られる．

2. 一部区間のみに制御を加えた場合では，局所壁面摩擦係数の分布は比較的複雑であるが，全体としての抵抗低減効果は制御長さ割合にほぼ比例という単純な関係となる．

本研究は，文部科学省開放的融合研究推進制度の援助を受けた．記して謝意を表する．

引用文献

1) 笠木: 航空宇宙学会誌 **48(554)** (2000) 13.
2) H. Choi, P. Moin & J. Kim: *J. Fluid Mech.* **262** (1994) 75.
3) C. Lee, J. Kim & H. Choi: *J. Fluid Mech.* **358** (1998) 245.
4) T. Endo, N. Kasagi & Y. Suzuki: *Int. J. Heat Fluid Flow* **21** (2000) 568.
5) K. Iwamoto, Y. Suzuki & N. Kasagi: *Int. J. Heat Fluid Flow*, (2002, to appear).
6) K. Fukagata & N. Kasagi: *J. Comput Phys.* (under revision).
7) E. P. Hammond, T. R. Bewley, and P. Moin, *Phys. Fluids* **10** (1998) 2421.
8) K. Fukagata & N. Kasagi: In *Engineering Turbulence Modelling and Experiments 5* (Elsevier) (2002, to appear).

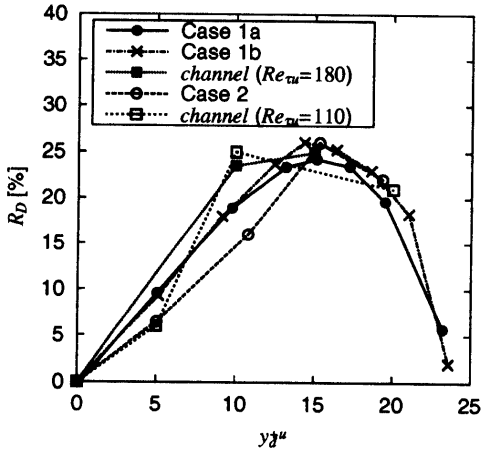

Figure 3 Drag reduction rate vs. detection plane height.

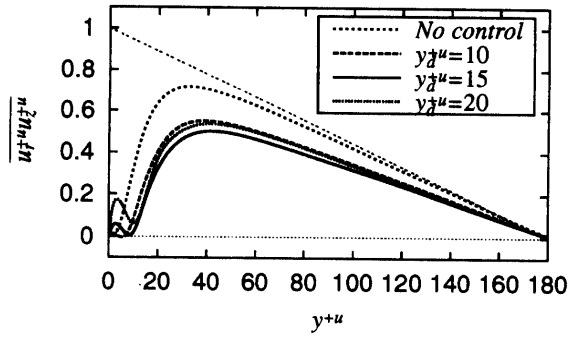

Figure 4 Reynolds stress.

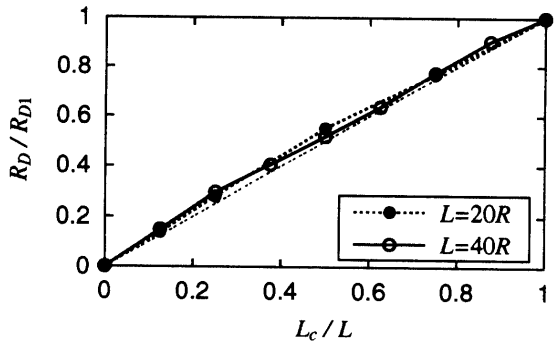

Figure 5 Normalized drag reduction rate vs. control length.

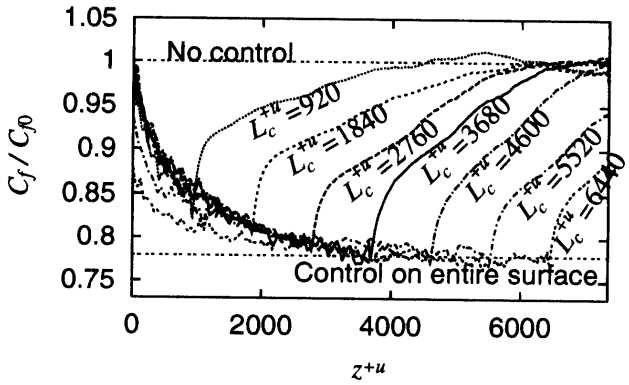

Figure 6 Streamwise diztribution of skin friction coefficient.

NII-Electronic Library Service