

壁面近傍レイノルズ剪断応力の操作を目的とした準最適制御アルゴリズム Suboptimal control algorithm aiming at manipulation of near-wall Reynolds shear stress

深湯康二（産総研／東大工），笠木伸英（東大工）

アクティブ・フィードバック制御によって壁乱流の摩擦抵抗低減を達成するためには，センサ，コントローラ，及びアクチュエータより構成されるハードウェアシステムの性能と共に，ソフトウェア要素である制御アルゴリズムの出来が重要であるが，センサ情報が流れ方向壁面剪断応力のみ限定される場合の制御則（以下， τ_w -制御則と略記）の構築は以前からの課題であった．

前年度，MEMS 班では遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた最適化手法による τ_w -制御則の構築を行い，約 12 %の抵抗低減が低レイノルズ数($Re_{\tau_w} \approx 100$ ；添字 u は非制御時の摩擦速度に基づくことを表す)におけるチャンネル乱流の直接数値シミュレーション(DNS)によって示された¹⁾．この結果を受け，制御システムの評価実験においても同様の最適化が試みられている²⁾．しかしながら GA による最適化では，計算量／実験回数の制約から，しばしば直観に基づいて最適化すべきパラメータを事前に絞り込む必要があり，それによって大域的最適解を得られない可能性も考えられなくない．

直観に頼らず制御則を構築するには，制御理論に基づく定式化が有力である．近年 Lee らは，準最適制御理論に基づき，流れ方向壁面剪断応力を直接極小化するような τ_w -制御則を解析的に求めたが，その制御則を用いた DNS では抵抗低減効果は得られなかった³⁾．

ところで，乱流摩擦抵抗と層流摩擦抵抗の差はレイノルズ剪断応力分布の重みつき積分に比例し，その重みは壁に近いほど大きい⁴⁾．そこで本研究では，まず壁面近傍におけるレイノルズ剪断応力を抑制し，さらにその変化が壁から離れる方向へ「伝播」する二次的効果⁵⁾により抵抗低減を達成すべく，以下の評価関数を提案する．

$$J(\phi) = \ell \int_t^{t+\Delta t} \int_S \phi^2 dSdt + \int_t^{t+\Delta t} \int_S (-u'v')_{y=Y} dSdt \quad (1)$$

ここに ϕ は制御入力(局所吹き出し吸い込み速度)， ℓ は制御の単価である．これを壁面剪断応力を用いて適当に近似し，極小値を与える ϕ を Lee らと同様の手法³⁾で求解したところ，GA で得られたもの¹⁾と全く異なる τ_w -制御則が得られた．この制御則を $Re_{\tau_w} \approx 180$ の円管内乱流の DNS⁶⁾に適用した場合に，現時点で約 12 % の平均抵抗低減率が達成されている．このとき壁面近傍のレイノルズ剪断応力は負の値となった(図 1)．今後さらに抵抗低減率の向上を目指し，求解に用いる近似の精度向上を中心に改良を加える予定である．

参考文献

- 1) K. Morimoto et al., *Proc. 3rd Symp. on Smart Control of Turbulence* (2002), pp. 107-114.
- 2) T. Yoshino et al., *Proc. 5th JSME-KSME Fluids Eng. Conf.* (2002), Paper No. OS4-1.
- 3) C. Lee et al., *J. Fluid Mech.* **358**, 245-258 (1998).
- 4) K. Fukagata et al., *Phys. Fluids* **14**, L73-L76 (2002).
- 5) K. Fukagata & N. Kasagi, *Int. J. Heat Fluid Flow* (submitted).
- 6) K. Fukagata & N. Kasagi, *J. Comput. Phys.* **181**, 478-498 (2002).

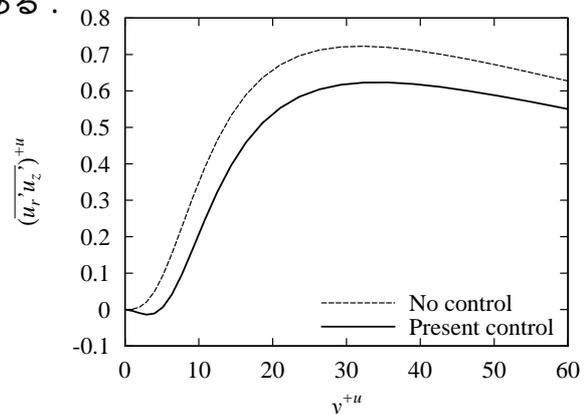


図 1 レイノルズ剪断応力