

壁面進行波によるポンプ効果

Pumping Effects by Surface Traveling Waves

オブナー ジェローム (パリ第6大) ○ 正 深淵 康二 (慶大)

Jérôme HOEFFNER, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France
Koji FUKAGATA, Keio University, Hiyoshi, Kohoku-ku Yokohama 223-8522

Two types of wall actuation in channel flow are considered: traveling waves of wall deformation (peristalsis) and traveling waves of blowing and suction. The flow response and its mechanisms are analyzed using numerical simulations. We show that both actuations induce a flux in the channel in absence of imposed pressure gradient and can thus be characterized as pumping. It is demonstrated that the wall deformation induces forward pumping, whereas the blowing and suction induces backward pumping.

Key Words: flow control, drag reduction, pumping, numerical simulation

1 緒言

近年, アクティブ制御による壁乱流の摩擦抵抗低減に関する理論的, 数值的, 実験的研究が精力的に行われている⁽¹⁾が, その展望を論じるにあたり, 制御による抵抗低減効果の理論的限界を知ることは極めて重要である.

Bewley⁽²⁾は「流量一定の平行平板間流においてゼロ正味流量の吹出し・吸込み制御によって達成しうる摩擦抵抗の下限は層流の摩擦抵抗値である」という仮説 (Bewley 仮説) を提唱したが, その反例として, Minら⁽³⁾は上流方向への進行波状吹出し・吸込みによって層流値以下の摩擦抵抗が得られることを, 線形解析および直接数値シミュレーション (DNS) を用いて示している. 特に彼らの制御では, 平行平板間層流に対して制御入力を加えた場合にも摩擦抵抗低減が得られることが, 既存の制御とは大きく異なる.

これに関連して, Fukagataら⁽⁴⁾および Bewley⁽⁵⁾は, 摩擦抵抗が層流値以下になった場合, ポンプ動力と制御に必要な動力の和 (全動力) は, 同じ流量の層流 (厳密には Stokes 流⁽⁴⁾) を駆動するポンプ動力よりも必ず大きくなるということを数学的に証明している. 即ち, 上述の Minら⁽³⁾の制御を平行平板間層流に加えた場合には, 全動力の観点からは必ず損をするということである.

本講演では, Minら⁽³⁾の壁面進行波制御による抵抗低減機構が, レイノルズ応力の減少による通常の摩擦抵抗低減機構⁽⁶⁾ではなく, むしろ壁面からのポンプ効果であることを示す. そのために, 平行平板間の静止流体に対して壁面進行波状制御入力を加えた数値シミュレーションを行い, 正味の流量が発生することを確認する. 壁面進行波としては, 壁面変形によるものと, 壁面からの吹出し・吸込みによるものを考える.

2 壁面進行波によるポンプ効果

二次元平行平板間の非圧縮静止流体に対して, 進行波状の壁面変形および壁面からの吹出し・吸込みを加えた場合の数値シミュレーションを行った. 進行波としては正弦波状の変形あるいは吹出し・吸込み速度を考える. 本問題は進行波と同じ速度で進む座標から観測すれば定常問題として扱うことができる. 空間離散化には4次精度中心差分を用い, ニュートン法を用いて定常状態の場を求めた.

Figure 1 に数値シミュレーションによって得られた速度ベ

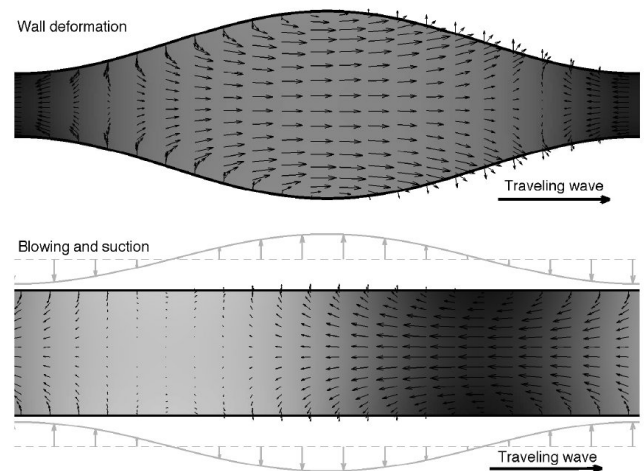


Fig. 1: Velocity (vectors) and pressure fields (dark, low; light, high) in the peristalsis and blowing/suction cases. From Hoëffner & Fukagata⁽⁷⁾.

クトル・圧力場を示す. いずれの場合にも同じ波長の進行波が加えられているが, 壁面変形の場合には誘起される流れは入力波の進行方向に, 吹出し・吸込みの場合に進行方向とは逆方向に正味の流量が発生していることがわかる.

壁面変形の場合のポンプ効果の機構は以下のように説明できる. まず, 収縮しつつある領域の圧力が上昇し, 膨張しつつある領域の圧力が減少する. いま考えている系は波の進行方向に周期的であるので, もし粘性の影響を考えなければ正味の流量は発生しないはずである. しかし実際には粘性による壁面摩擦抵抗が収縮部では大きく, 膨張部では小さくなるため, より抵抗の小さい膨張部での順方向の流量が収縮部における逆方向の流量を上回り, 全体としては順方向の流量が発生することになると考えられる.

上述の機構を確認するため, その効果がより浮き彫りになるような進行波の波形を仮定し, モデルを構築する. 具体的には

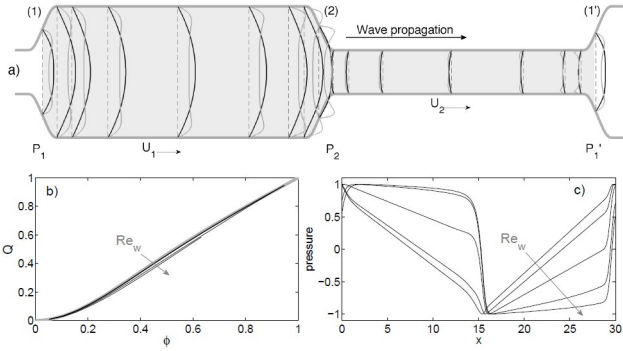


Fig. 2: Configuration of the peristaltic pumping model (2.6). a) Velocity profiles for $\phi = 0.5$, wavelength $L = 30$ and $Re_w = 1$ (black) and $Re_w = 1000$ (light gray) for $Re_w = 0.1, 1, 10, 100, 1000$: b) flux Q as a function of the constriction ϕ ; and c) normalized centerline pressure along one wavelength. From Hoepffner & Fukagata⁽⁷⁾.

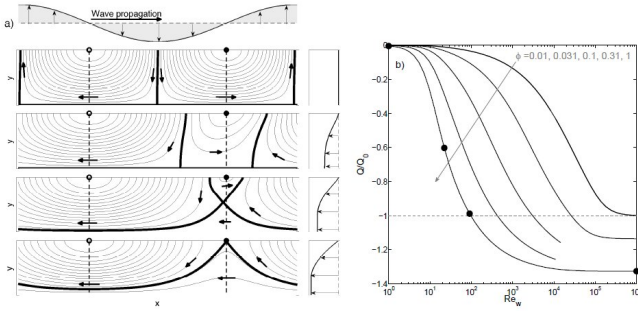


Fig. 3: Traveling wave of blowing and suction. a) Instantaneous streamlines and averaged streamwise profile in the upper half of the channel for $\phi = 1$ at Reynolds corresponding to the black dots of b). b) Mean flux normalized by $|Q_0|$ as a function of the Reynolds number for 5 different ϕ . From Hoepffner & Fukagata⁽⁷⁾.

Fig. 2a に示すような矩形波状の波形である。上述の機構に従って適切に定式化すると、進行波の振幅が ϕ の場合に誘起される正味の流量 Q は

$$Q = \phi \frac{(1 + \phi)^3 - (1 - \phi)^3}{(1 + \phi)^3 + (1 - \phi)^3} \quad (1)$$

と表されることがわかる⁽⁷⁾。ここに全ての物理量はチャンネル半幅 h および進行波の位相速度 c で無次元化されており、レイノルズ数は $Re_w = ch/\nu$ と定義できる。このレイノルズ数 Re_w を変化した場合、数値シミュレーションおよび式 (1) から計算される無次元流量 Q の比較を Fig. 2b に示すが、両者は良く一致することが確認できる。また Fig. 3 にはこのときの中心線上における圧力分布（最大値で規格化）を示すが、この様相も上述の機構を裏付けている。

吹出し・吸込みの場合の正味流量の発生機構も、順方向流量と逆方向流量の差によるという点では壁面変形の場合と同様であるが、その詳細は異なっている。異なるレイノルズ数 Re_w での吹出し・吸込みにおける瞬時場の流線を Fig. 3a に示す。レ

イノルズ数（波の位相速度）が十分小さい場合には順方向および逆方向に向かう流線は壁面より均等に配分されているが、レイノルズ数が増えるにつれ、逆方向の流線が増加し、順方向の流線が減少する。これが、進行波状吹出し・吸込みによって逆方向の正味流量が発生する基本的な機構である。

十分に高いレイノルズ数 $Re_w = 10^6$ では順方向の流線が完全に消滅していることが分かる。この場合の流量 Q_0 は、波長を L 、吹出し・吸込み速度を $\eta(x)$ として

$$Q_0 = \frac{1}{L} \int_0^L x\eta(x)dx \quad (2)$$

と表され、正弦波の場合には $Q_0 = -\phi L/2\pi$ と計算される⁽⁷⁾。異なる吹出し・吸込み強度 ϕ およびレイノルズ数 Re_w のもとに計算された流量 Q を $|Q_0|$ で規格化したものを Fig. 3b に示す。レイノルズ数が増えるにつれ、逆方向の流量は増加し、一定値に収束する。強度 ϕ が小さい場合、収束した流量が式 (2) で求められる Q_0 を超えているが、これは Fig. 3a に見られるように、壁面と接続していない流線が存在することによって考えられる。

3 結言

二次元平行平板間の静止流体に対して、進行波状の壁面変形および吹出し・吸込みを加えた結果、どちらの場合にも正味の流量が発生した。即ち、この効果は壁面からのポンプ効果であると考えられる。発生する流量は壁面変形の場合には波の進行方向から見て順方向、吹出し・吸込みの場合には逆方向であり、その基本的な機構を明らかにした。

この進行波状吹出し・吸込みを流量一定のチャンネル乱流に適用した場合⁽³⁾の摩擦抵抗低減は、壁面からのポンプ効果によって、流量を一定に保つための平均圧力勾配の一部が肩代わりされることによって起こると考えられる。加えて、乱流の場合には、壁面近傍のレイノルズ応力の減少による乱流生成の減少も起こり、これらが複合的に摩擦抵抗低減に寄与していると考えられる。

本研究は科研費奨励研究 (19-07821) および科研費基盤研究 (A) (20246036) の助成を受けたものである。

参考文献

- (1) Kasagi, N., Suzuki, Y. & Fukagata, K., “Microelectromechanical systems-based feedback control of turbulence for skin friction reduction,” *Annu. Rev. Fluid Mech.* **41**, 231-251 (2009).
- (2) Bewley, T. R., “Flow control: new challenges for a new renaissance,” *Prog. Aerospace Sci.* **37**, 21-58 (2001).
- (3) Min, T., Kang, S. M., Speyer, J. L. & Kim, J., “Sustained sub-laminar drag in a fully developed channel flow,” *J. Fluid Mech.* **558**, 309-318 (2006).
- (4) Fukagata, K., Sugiyama, K. & Kasagi, N., “On the lower bound of net driving power in controlled duct flows,” *Physica D* **238**, 1082-1086 (2009).
- (5) Bewley, T. R., “A fundamental limit on the balance of power in a transpiration-controlled channel flow,” *J. Fluid Mech.* **632**, 443-446 (2009).
- (6) Fukagata, K., Iwamoto, K. & Kasagi, N., “Contribution of reynolds stress distribution to the skin friction in wall-bounded flows,” *Phys. Fluids* **14**, L73-L76 (2002).
- (7) Hoepffner, J. & Fukagata, K., “Pumping or drag reduction?” *J. Fluid Mech.* (to appear).