

粘弾性被膜による流体制御の数値シミュレーション

遠藤誉英*, 姫野龍太郎

理化学研究所 生体力学シミュレーション特別研究ユニット

埼玉県和光市広沢 2-1

* Email: tendo@riken.jp

A direct numerical simulation of turbulent channel flow over a compliant surface has been performed to evaluate the friction drag reduction effect. The compliant surface is modeled in a mass, damper and spring system. The material properties are determined so that the wall velocity is in phase with the wall pressure. A slight drag reduction is observed, together with a weak wall displacement of the compliant surface.

A numerical code is also constructed for solving flow across a three-dimensional deformable bluff body. In the present study, flow across a compliant cylinder and sphere is analyzed numerically to evaluate the drag reduction effect with a compliant surface. An increase of pressure drag is observed while the friction drag is decreased by deformation of the compliant surface. Therefore, compliant surface is expected to be applicable to a drag reduction device where the friction drag is dominant.

1. 緒言

水中生物は独自の進化の過程で、ユニークな流体制御技術を発展させてきた。その代表例がサメやイルカである。サメの鱗を基に設計されたリブレット面は、8%程度の抵抗低減効果があるが、特定の流速の流れにおいてのみ効果があることが知られている。イルカは最高時速 70 km の高速水泳が可能であるが、イルカの筋肉の量はそれに対して十分ではない。これはグレイのパラドックスとして有名である [1]。そのため、イルカの柔軟な肌（粘弾性皮膚）が周囲流体を効果的に制御していると考えられている。また、リブレット面とは異なり、よりフレキシブルな流体制御が可能であると期待されている。粘弾性皮膚の研究は Kramer[2] によって始められ、粘弾性皮膚は、乱流遷移遅延効果および摩擦抵抗低減効果があると考えられている。

Carpenter & Garrad[3] は粘弾性皮膚をバネ群に支えられた弾性板にモデル化し、その上で線形攪乱方程式を解くことによって、乱流遷移レイノルズ数が増加することを示した。粘弾性被膜の応用として、航空機や大型船舶などの輸送機が想定されるが、粘弾性被膜の変形が圧力抵抗や摩擦抵抗および揚力に及ぼす影響は、いまだ不明である。一方、20%以上に及ぶ摩擦抵抗低減効果が、Kramer[2] および Chu & Blick[4] によって報告されているが、それらは実験精度の面から結果に疑問が残る。粘弾性皮膚の物性値が周囲環境によって変化しやすいことや、変形する壁面近傍の詳細な計測が困難であるため、粘弾性皮膚の摩擦抵抗低減効果を示す詳細なデータは得られていない。

近年、計算機性能が飛躍的に発展し、粘弾性被膜のような移動壁面近傍の詳細な乱流場を計算することが可能となっており、粘弾性被膜の流体制御メカニズムを調査することができると期待されている。また、数値シミュレーション上では、粘弾性被膜の物性値に仮想的な値を与えることも可能であり、流体制御に最適な粘弾性被膜の物性値を、仮想実験的に求めることが可能であると期待される。

本研究では、まず粘弾性被膜を有する平行平板間乱流の直接数値シミュレーションを行い、粘弾性被膜による乱流摩擦抵抗低減効果の真偽を調査することを目的とする。また、摩擦抵抗に重要な寄与を及ぼす乱流準秩序構造を効果的に抑制するために最適な粘弾性被膜粘弾性被膜の物性値を検討する。さらに、粘弾性被膜を有する円柱や球周囲の流れの数値解析を通じて、粘弾性被膜が圧力・摩擦抵抗および揚力に及ぼす影響を調査し、粘弾性被膜の輸送機器における流体制御デバイスとしての応用可能性を探る。

2 粘弾性被膜を有する平行平板間乱流の直接数値シミュレーション

本節では、粘弾性被膜を有する平行平板間乱流の直接数値シミュレーションを行い、粘弾性被膜の摩擦抵抗低減効果の真偽を調査し、摩擦抵抗低減に最適な粘弾性被膜の物性値を検討する。

2.1 数値計算手法

支配方程式には非圧縮のナビエ・ストークス式と連続の式を用い、壁面の变形は移動境界を伴う境界適合座標系によって表現した。時間進行に修正クランク・ニコルソン型フラクショナル・ステップ法 [5]、空間離散化に 2 次精度中心差分を用いた。流れ方向 (x -) とスパン方向 (z -) に周期境界条件を、壁面で粘着条件を課した。また、圧力解法に多重格子法 [6] を用いた。収束を加速するために 2 段階のメッシュを用い、両メッシュにおける計算に SOR 法を用いた。

計算領域は、チャンネル半幅を δ として、流れ方向 (x -), スパン方向 (z -) にそれぞれ $2.5\pi\delta$, $0.75\pi\delta$ とした。本計算では流量一定条件を課し、バルク平均流速 U_b とチャンネル幅 2δ に基づくレイノルズ数を $Re_b \equiv U_b 2\delta/\nu = 4600$ とした。なお、摩擦速度 u_τ と δ に基づくレイノルズ数は $Re_\tau \equiv u_\tau \delta/\nu \sim 150$ である。この時、計算領域の大きさは x -, z - 方向にそれぞれ $1120\nu/u_\tau$, $353\nu/u_\tau$ である。以後、上つきの + は壁面非变形時の平均摩擦速度 $u_{\tau c}$ 及び動粘性係数 ν による無次元化を表す。

計算格子数は流れ方向、壁垂直方向 (y -), スパン方向にそれぞれ 96, 97, 96 とり、 x - 方向と z - 方向の格子間隔は $\Delta x^+ = 12.3$, $\Delta z^+ = 3.7$ で一定とした。また、 y - 方向には、壁面近傍で細くなる不等間隔格子を用いた。このとき、最小格子幅は $\Delta y^+ = 0.25$ である。また、時間刻み幅は $\Delta t^+ = 0.33$ とした。

初期条件には、十分発達したチャンネル乱流の瞬時場を用い、上下壁面とも変形が可能な粘弾性皮膜とする。

2.2 粘弾性皮膜のモデル化

本研究の第一段階として、粘弾性皮膜の物性は等方的であると仮定する。Carpenter & Morris[7] は変形の異方向性が Travelling-Wave Flutter (TWF) の安定化に寄与すると報告した。しかしながら、本研究では、粘弾性皮膜の变形が乱流構造へ及ぼす影響を検討するために、材質は等方であるとし、粘弾性皮膜の単純なモデル化を行なった。本研究では、粘弾性皮膜上の各格子点は、 y 方向のみに移動可能と仮定し、変形をバネ・マス・ダンパ系にモデル化した (図 1)。また、変形量 y_w は以下の式に従うとする [8]。

$$m \frac{\partial^2 y_w}{\partial t^2} + c \frac{\partial y_w}{\partial t} + k y_w = \Delta x \Delta z \left(-p'_w + T_x \frac{\partial^2 y_w}{\partial x^2} + T_z \frac{\partial^2 y_w}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

ここで、 d は粘弾性皮膜の厚さ、 m は $m \equiv \rho_c \cdot \Delta x \cdot \Delta z \cdot d$ (ρ_c は粘弾性皮膜の密度) で定まる、計算格子体積辺りの粘弾性皮膜の質量、 c, k はそれぞれ減衰係数、バネ定数とする。また、 p'_w は壁面圧力変動を、 T_x, T_z はそれぞれ流れ方向、スパン方向への粘弾性皮膜にかかる張力を表す。

式 (1) を変形し、層流仮定中心流速 U_c およびチャンネル半幅 δ で無次元化を行なうと式 (2) を得る。

$$\frac{\partial^2 y_w^*}{\partial t^{*2}} + 2\zeta_0^* \frac{\partial y_w^*}{\partial t^*} + \omega_0^{*2} y_w^* = -\frac{p_w^*}{\rho^* d^*} + \tau_x^* \frac{\partial^2 y_w^*}{\partial x^{*2}} + \tau_z^* \frac{\partial^2 y_w^*}{\partial z^{*2}}. \quad (2)$$

ここで、 $\zeta_0 \equiv c/(2m)$, $\omega_0 \equiv \sqrt{k/m}$ とし、 $d^* = d/\delta$, $\rho^* = \rho_c/\rho_f$ (ρ_f は流体密度) とするが、以下簡略化のため、 U_c と δ による無次元化を示す * は省略する。

式 (2) より多数のパラメータの選択が必要となることがわかる。本研究で用いた流体のレイノルズ数および物性パラメータは、 $\delta = 0.04[m]$, $\nu = 10^{-6}[m^2/s]$, $U_c = 86.9[mm/s]$, $d = 28[mm]$, $\rho_f = 10^3[kg/m^3]$ で一定と仮定した。

本報では、粘弾性皮膜の变形が乱流構造に与える影響を調べるために、第一段階として、粘弾性皮膜にかかる水平方向の張力 T_x, T_z (τ_x, τ_z) を無視し、残るパラメータである $c, k(\zeta_0, \omega_0)$ を変化させることとする。なお、バ

ネ定数 ω_0 は粘弾性皮膜のヤング率 Y と以下の関係によって結びつけられる.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{Y \Delta x \Delta z / d}{\rho_c d \Delta x \Delta z}} = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{Y}{\rho_c}}. \quad (3)$$

2.3 壁面近傍の乱流準秩序構造および粘弾性被膜の物性値の決定

壁面近傍の乱流準秩序構造は乱流摩擦抵抗に大きな寄与を及ぼすことが知られている. そのため, 乱流準秩序構造の再生メカニズムを抑制することによって, 効果的な摩擦抵抗低減が得られると考えられる. 粘弾性被膜は壁面圧力によって変形するため, 壁面圧力と乱流準秩序構造の関係を調査する必要がある. そこで, 非変形平行平板間乱流の直接数値計算のデータベースを用い, 壁面圧力 p'_w の正負による条件付抽出を行った. ここで, 強いイベントを抽出するため, $|p'_w| = 2.0$ を閾値として用いた. 図2は検出点を図中央とし, 低及び高壁面圧力領域近傍の $y^+ = 15$ における流れ方向平均渦度 $\langle \omega_x^+ \rangle$ を示している. 低・高壁面圧力上方にはそれぞれ正および負の壁面垂直方向速度成分が存在し, それぞれイジェクション (Q2) とスウィープ (Q4) イベントが起こっていることが分かる.

Jeong ら [9] は図3に示すように, 壁面近傍における縦渦の再生メカニズムの概念モデルを構築した. 子渦は低速ストリークのスパン方向揺動に伴い, 親渦の上流側に生成される. また, 子渦の流れ方向渦度は親渦とは正負が逆になる. これらの知見に基づき, 図4に親子縦渦の下方の壁面圧力変動分布の概念図を示す. ここで, 図の (A-A') 横断面の壁面圧力変動は波状分布をしていると仮定する.

Choi ら [10] は, バッファ域における壁面垂直方向速度成分と対向する壁面からの局所吹き出し, 吸い込みを行う乱流制御アルゴリズム (v-control アルゴリズム) を提案し, 平行平板間乱流の直接数値シミュレーションを用いて検討した. 彼らの計算結果は, 25% に及ぶ摩擦抵抗低減を示し, v-control アルゴリズムは, 壁面近傍の縦渦構造の回転運動を抑制することを示した. また, 近年 Endo ら [11] は, v-control アルゴリズムに従って変形する壁面変形アクチュエータによっても, 吹き出し, 吸い込みと同様に, 縦渦構造を抑制することを示した. そのため, 粘弾性被膜が v-control アルゴリズムと同様の変形を行うように物性値を定めることによって, Endo ら [11] が示したのと同様に縦渦構造の抑制が可能であると期待される. そこで, v-control アルゴリズムに従えば, 図4に概念的に示すように, 壁面変形速度が壁面圧力変動と同位相となればよいことが分かる.

縦渦構造を抑制するのに最適な粘弾性被膜の物性値の組み合わせを求めるため, 式 (2) に $p'_w \equiv p_r \sin(ft)$ で与えられる正弦波の圧力変動を代入した際の理論解を求める [12]. ここで, ζ_0 と ω_0 の間には, 壁面速度 $v_w \equiv \partial y_w / \partial t$ が p'_w と同様な振動解を持つように, $D' \equiv \zeta_0^2 - \omega_0^2 < 0$ の制限が加わる. 壁面変形量と壁面変形速度の振動解は以下のように与えられる;

$$y_w = -\frac{p_r}{\rho d} \frac{1}{\sqrt{G}} \left\{ e^{-\zeta_0 t} \cdot \frac{f}{\sqrt{D}} \sin(\sqrt{D}t + F) + \sin(ft) \right\}, \quad (4)$$

および

$$v_w = -\frac{p_r}{\rho d} \frac{f}{\sqrt{G}} \left\{ \frac{\omega_0}{\sqrt{D}} e^{-\zeta_0 t} \sin(\sqrt{D}t + F + I) - \sin\left(ft + H - \frac{\pi}{2}\right) \right\}, \quad (5)$$

ここで, $G = (f^2 - \omega_0^2)^2 + (2\zeta_0 f)^2$, $D = -D' = \omega_0^2 - \zeta_0^2$ である. このうち, 位相差 F, H, I は以下のように与えられる;

$$\begin{aligned} \tan F &= 2\zeta \sqrt{D} / (f^2 + 2\zeta_0^2 - \omega_0^2), \\ \tan H &= -2\zeta f / (\omega_0^2 - f^2), \\ \tan I &= -\sqrt{D} / \zeta_0. \end{aligned} \quad (6)$$

非減衰項 (式 (5) の右辺第 2 項) から, 壁面変形速度 v_w が圧力変動 p_w と同位相であるために, $H = (2m + 1/2)\pi$, ($m = 1, 2, \dots$) である必要が生じる. これより $\omega_0 = f$ が導かれる. 壁面圧力の特徴的な周波数 f は $f \equiv 2\pi/T$ (T は壁面圧力の時間スケール) で与えられるため, 粘弾性被膜のヤング率 Y は,

$$Y = \rho_c (d\omega_0)^2 = \frac{4\pi^2 \rho_c d^2}{T^2}, \quad (7)$$

で与えられる. 壁面圧力変動の特徴的な時間スケール T は, その流れ方向の長さスケールと流れの対流速度によって見積もられる. Johansson ら [13] は, 平行平板間乱流のアンサンブル平均化された VISA イベント及び, 条件付抽出された剪断層のデータから, 壁面圧力の流れ方向長さスケールはおおよそ $100 \sim 200\nu/u_\tau$ であると見積もっている. 一方, $y^+ = 15$ における対流速度はおおよそ $10u_\tau$ であるため, 壁面圧力変動の特徴的な時間スケールは $T^+ = 10 \sim 20$ 程度であると見積もられる. そのため, 壁面圧力変動と同位相に変形を行う粘弾性被膜のヤング率は, 式 (7) によって, $Y = 15.3 \sim 61.4[Pa]$ である必要がある.

なお, 弾性ゴムのヤング率は $1[MPa]$, 人間の皮膚のヤング率は $150[MPa]$ のオーダーであり, ここで求められた粘弾性被膜のヤング率はこれらの値に比較すると非常に小さいが, 粘弾性皮膜の変形が乱流構造に与える影響を調査することを目的として, 粘弾性皮膜の変形が過大にならない程度に十分変形するようにヤング率 (パネ定数) を定めた. Gad-el-Hak *et al.*[14] が実験で用いた PVC (Polyvinyl chloride resin) と dioctyl phthalate を混合した粘弾性皮膜は, 混合比によって $Y = 5 \sim 12,500[Pa]$ のヤング率を持つ. そのため, 本計算で用いたヤング率は, 非現実的な値ではないといえる. また, 本研究では, 減衰係数として $c = 1.6 \times 10^{-3}[kg/s]$ を採用した.

2.4 計算結果

図 5 に, 非変形平行平板間乱流の流れ方向平均圧力勾配で正規化された粘弾性被膜を有する平行平板間乱流の流れ方向圧力勾配の時間変化を示す. 本研究では, 壁面の変形に伴う圧力抵抗は非常に小さいため, 摩擦抵抗と全抵抗はほぼ同義であり, それは流れ方向圧力勾配と釣り合う. 非変形平行平板間乱流に比べ, 粘弾性被膜の変形によって摩擦抵抗はわずかに減少し, $t^+ \sim 700$ において 7% の最大摩擦抵抗低減を示した. また, $t^+ = 0 \sim 1000$ における平均抵抗低減率は約 3% である.

粘弾性被膜を乱流制御デバイスとして応用した際, 本計算で得られた摩擦抵抗低減率は製作コストを考慮すると実用的ではない. しかしながら, 変形のためにエネルギー投入を必要とせず, 流体圧力を受けて受動的に変形する粘弾性被膜によって乱流摩擦抵抗低減が図れることが明らかになった. エネルギー投入を必要としないため, 初期加工のみのコストで摩擦抵抗低減が得られることは, 現実のアプリケーションに向けて大きな長所であると考えられる.

図 6 は非変形平行平板間乱流の瞬時場のトップビューである. 流れは図の左から右である. 赤色と青色の等値面はそれぞれ高速・低速ストリークを, 白色の等値面は渦構造を示している ($II'^+ = -0.03$, II' は変形速度勾配テンソルの第二不変量)[15,16]. 渦構造は揺動する低速ストリークの後流側に多く観察される [9,11]. また, 渦構造の回転運動によって活性化されたストリークの揺動によって連続的に渦構造が再生成されている.

図 7 に, 粘弾性被膜を有する平行平板間乱流の瞬時場のトップビューを示す. 壁面の色は粘弾性被膜の変形量 y_w を示している. 本計算では大きな抵抗低減率は得られていないため, 乱流場中の渦構造やストリーク構造に大きな変化は見られないが, 高速及び低速ストリークの強度は若干弱まっている. また, 粘弾性被膜の変形の特徴的な形状はスパン方向に一様な波状であった.

3 粘弾性被膜を有する物体周囲の流れの数値シミュレーション

本節では、粘弾性被膜を有する物体周りの流れの数値シミュレーションを行い、粘弾性被膜が圧力・摩擦抵抗や揚力に及ぼす影響を考察する。対象物体として、実験や計算例の蓄積の多い円柱や球を取り上げる。

3.1 数値計算手法

支配方程式は非圧縮の連続の式と運動量保存式であり、球表面は移動境界を伴う境界適合座標系を用いて表現した。時間進行に陰的オイラー法を用い、対流項以外の空間離散化は二次精度中心差分を適用した。対流項には境界適合座標系における三次精度風上差分 [17] を用いた。圧力解法には SOR 法を用い、マルチカラー法によって、ベクトル化や並列化を行っている。円柱・球表面で粘着条件を、外側境界の上流側で流速 U_∞ の一様流を、下流側で速度の流れ方向 2 階微分を零となるように与えた。

円柱の場合の計算領域は、図 8 に示すように、円柱直径を $D = 2r_0$ として、半径 $30D$ の円柱として与え、軸方向には $4D$ とった。また、軸方向には周期境界条件を適用した。計算格子は O 型格子とし、円周方向 ξ 、半径方向 η 、軸方向 $\zeta (= z)$ にそれぞれ $N_\xi = 160, N_\eta = 101, N_\zeta = 10$ 点を取った。レイノルズ数は $Re \equiv U_\infty D / \nu = 80$ とし、時間刻みは $\Delta t = 0.01$ とし、十分発達した瞬時流れ場から円柱の変形を開始した。

球周囲の流れの計算においては、極における座標変換のヤコビアンが零となり、極における計算ができない。本研究では計算の容易さから、姫野ら [18] に従い、極における物理量を、極近傍の格子点における物理量の平均値として与える方法を採用する。球の場合の計算領域は、球直径を $D = 2r_0$ として、半径 $30D$ の球として与えた。計算格子は O 型格子とし、方位角方向 θ 、半径方向 η 、天頂角方向 ψ にそれぞれ $N_\theta = 80, N_\eta = 101, N_\psi = 80$ 点を取った。時間進行幅は $\Delta t = 0.005$ とし、レイノルズ数 $Re = DU_\infty / \nu = 400$ として、十分に発達した瞬時流れ場から球の変形を開始した。以後、全ての変数は U_∞ および D で無次元化される。

3.2 粘弾性皮膜のモデリング

本計算においても、平行平板間乱流と同様に、粘弾性皮膜の物性は等方的であると仮定した。球表面上の全ての格子点は、半径方向 (η) にのみ移動可能であると仮定し、粘弾性皮膜の変形は、バネ・マス・ダンパ系にモデル化した (図 9)。簡単化のため粘弾性皮膜の張力を無視した円柱および球表面の変形は以下のように記述される [19]。

$$\frac{\partial^2 d}{\partial t^2} + 2\zeta_0 \frac{\partial d}{\partial t} + \omega_0^2 \left(d - \frac{1}{2} \right) = (P_\eta - \tilde{P}_\eta), \quad (8)$$

ここで、 ζ_0 と ω_0 は無次元減衰係数、バネ定数を表す。

式 (8) において、粘弾性皮膜の変形の駆動力は圧力と摩擦応力の半径方向成分であり、以下のように定義される。

$$P_\eta \equiv \frac{-\{\alpha^{12}\tau_{12} + \alpha^{22}\tau_{22} + \alpha^{23}\tau_{23}\}}{\sqrt{(\alpha^{12})^2 + (\alpha^{22})^2 + (\alpha^{23})^2}}, \quad (9)$$

ここで、 $\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + (1/Re)(u_{i,j} + u_{j,i})$ は応力テンソル、 $\alpha^{ij} \equiv (1/J)(\partial\eta^i)/(\partial x_m) \cdot (\partial\eta^j)/(\partial x_m)$ はメトリックテンソルであり、 J は座標変換のヤコビアンである。円柱・球体積を一定に保つため、駆動力の球表面全域の平均値 (\tilde{P}_η) を式 (8) の右辺から引いている。

式 (8) において、本研究で採用した単純なモデルにおいても、多数のパラメータを決定する必要があることがわかる。円柱の計算において、表 1 に示すように、 ζ_0 と ω_0 の値を様々に変えて、圧力抵抗 C_{px} と摩擦抵抗 C_{τ_x} 及びその合抵抗 C_D の値の変化を観察した。

球の計算の場合には、粘弾性皮膜を有する円柱周囲の流れの数値解析における、主だったパラメータを採用した (表 2)。

3.3 結果および考察

図 10 に、ケース 2-a における円周各位置における粘弾性被膜の変形量の変化を示す。図 8 において $\theta = 0$ を円柱上流点とする。変形量は $\theta = 0, \pi$ において、変形初期段階を除いて、ほぼ一定となっている。他の点においては、変形量は直径の約 2% 程度と、非常に微小な変形を繰り返していることが分かる。

図 11 に、ケース 2-d の $t = 300$ における粘弾性円柱の瞬時の変形量および、周囲流れ場を示す。壁面の色は変形量を表しており、上流淀み点 ($\theta = 0$) では流れに対してフラットな形状に変形している。また、カルマン渦列が円柱後流に交互に放出されている様子がわかる。ここでは示さないが、本計算の低レイノルズ数の流れでは、カルマン渦列の放出周期を表すストローハル数には微小な変化しか見られなかった。三次元的な流体構造が観察される、より高レイノルズ数の流れの計算を行い、ストローハル数に及ぼす粘弾性被膜の影響を調査する必要があると考えられる。

図 12 に、一定のバネ定数に対して、減衰係数 ζ_0 を変化させた際の特徴的なケース (ケース 2-a, d, f) について、圧力抵抗 C_{px} の時間変化を示す。図 11 に示したように、円柱は流れに対してフラットな形状に変形し、投影面積が増大する。それに伴って、計算を行った全てのケースにおいて圧力抵抗は増大した。また、減衰係数が小さいほど変形量も大きくなり、圧力抵抗の増加率も高かった。

図 13 に、ケース 2-a, d, f における摩擦抵抗 $C_{\tau x}$ の時間変化を示す。最も大きな摩擦抵抗低減を示したのは、ケース 2-a であり、この時の摩擦抵抗低減率は約 2.6% である。しかしながら、ケース 2-a では圧力抵抗の増大率も大きいいため、全抵抗 C_D は他のケースよりも大きく増加している。しかしながら、粘弾性被膜による摩擦抵抗低減は可能であることが示されたため、全抵抗における摩擦抵抗の割合が大きな航空機や大型船舶において、粘弾性被膜は有効な抵抗低減デバイスとして応用可能であることが予想される。

粘弾性球に用いるパラメータを表 2 に示す。ケース 1~3 は、粘弾性円柱の計算において特徴的な振る舞いを示したパラメータを採用した。

図 14 に、非変形の球周囲の瞬時流れ場を示す。等値面は速度勾配テンソルの第二不変量の負値 ($II \equiv u_{i,j}u_{i,j} = -0.01$) を示し、回転運動が強い領域を示している。非変形の球の後流には、非一様な渦構造が観察され、球に振動する揚力が発生する現象が捉えられている。

図 15 に、粘弾性皮膜を有する球 (Case 1) 周囲の瞬時流れ場を示す。球の表面の色は変形量を表している。球の上流側は流れの圧力を受け、平坦な形状に変形している。これにより圧力による抗力が増加することが推測できる。また変形量の最大値は、淀み点において半径内側方向に $-0.06D$ 、淀み点から水平角でおよそ 80° の点で半径外側方向に $+0.03D$ である。球表面が凸に変形している点において圧力が極小値を取っていることが観察された。

物体周囲の全抗力係数は、圧力による抵抗 C_{px} と摩擦応力による抵抗 $C_{\tau x}$ に分けられる。本計算では、全抗力係数はおよそ 0.62 であり、そのうち圧力による抗力係数はおよそ 0.4 である。

図 16 に、圧力による抵抗係数 C_{px} の時間変化を示す。圧力抵抗は粘弾性皮膜が変形すると同時に増大している。また、粘弾性皮膜のバネ定数が小さいほど大変形を生じ、球の上流側は平坦な形状になる。その結果、流れ方向投影面積が増大するため、圧力抵抗が増大すると考えられる。

図 17 に、摩擦応力による抵抗係数 $C_{\tau x}$ の時間変化を示す。粘弾性皮膜の変形によって、摩擦抵抗はわずかに減少していることが分かる。本計算の流れ場のレイノルズ数 ($Re = 400$) では、全抵抗のうち摩擦抵抗が占める割合はおよそ 35% である。摩擦抵抗低減率は Case 1 においておよそ 3% 程度であり、全抗力は粘弾性皮膜の変形によって増加する結果となった。しかしながら、本計算によって粘弾性皮膜を有する三次元物体において、摩擦抵抗低減効果が確認されたため、全抵抗のうち摩擦抵抗の占める割合が 90% 以上を占める船舶や航空機において、抵抗低減デバイスとしての粘弾性皮膜の有効性が示唆される。

Table 1: Parameters for compliant cylinder and change of mean drag coefficients.

	ζ_0	ω_0	ΔC_{px}	$\Delta C_{\tau x}$	ΔC_D		ζ_0	ω_0	ΔC_{px}	$\Delta C_{\tau x}$	ΔC_D
Case 1	0.08	1	+82.86	+14.65	+63.53	Case 2-g	1.00	5	+2.63	-0.58	+1.72
Case 2-a	0.00	5	+17.48	-2.59	+11.79	Case 2-h	3.00		+0.97	-0.23	+0.63
Case 2-b	0.01		+16.52	-2.56	+11.11	Case 2-i	5.00		+0.60	-0.14	+0.39
Case 2-c	0.04		+14.19	-2.40	+9.48	Case 2-j	7.00		+0.43	-0.10	+0.28
Case 2-d	0.08		+11.95	-2.15	+7.95	Case 3-a	0.08	10	+3.07	-0.67	+2.01
Case 2-e	0.16		+9.10	-1.74	+6.03	Case 3-b	0.16		+2.84	-0.62	+1.86
Case 2-f	0.24		+7.37	-1.46	+4.87	Case 3-c	0.24		+2.65	-0.58	+1.73

Table 2: Parameters for compliant sphere and change of mean drag coefficients.

	ζ	ω_0	ΔC_{px}	$\Delta C_{\tau x}$	ΔC_D
Case 1	0.08	1	+30.9%	-3.40%	+18.6%
Case 2	0.04	5	+14.3%	-1.78%	+8.54%
Case 3	0.04	2	+29.60%	-1.59%	+18.4%

4. 結論

粘弾性皮膜がもつと考えられている乱流遷移遅延効果と乱流摩擦抵抗低減効果のうち、後者を検討することを目的とし、流体の壁面圧力変動によって受動的に変形する粘弾性皮膜を有するチャンネル乱流の直接数値計算コードを開発した。本研究では、粘弾性皮膜の変形をバネ・マス・ダンパ系にモデル化し、変形する粘弾性皮膜近傍の詳細な数値計算データを得て、壁面近傍における乱流構造に及ぼす効果を検討した。

壁面圧力の粘弾性被膜のヤング率を、壁面圧力と同位相になるように決定した直接数値計算において、平均で 3%、最大で 7% の摩擦抵抗低減が見られ、粘弾性被膜の物性値を適当に定めることによって、摩擦抵抗低減効果が得られることを示した。

さらに、粘弾性皮膜を有する円柱および球周りの流れの数値解析を行なった。粘弾性皮膜の変形を半径方向に限定した単純なモデルを採用した計算において、粘弾性皮膜が流体力によって変形することによって、圧力抵抗は増加するものの、摩擦抵抗は低減することが示された。このことは、全抗力のうち、摩擦抵抗が占める割合が多い、大型船舶などの輸送機器に粘弾性被膜を抵抗低減デバイスとして応用ができることを示唆していると考えられる。

参考文献

- [1] Gray J: *J. Exp. Biology* **50** (1936) 233-255.
- [2] Kramer M O: *Nav. Eng. J.* **72** (1960) 25-33.
- [3] Carpenter P W and Garrad A D: *J. Fluid Mech.* **155** (1985) 465-510.
- [4] H. H. Chu and E. F. Blick: *J. Spacecraft and Rockets* **6** (1969) 763-764.
- [5] Choi H and Moin P: *J. Comput. Phys.* **113** (1994) 1-4.
- [6] Demuren A O and Ibraheem S O: *AIAA J.* **36** (1998) 31-37.
- [7] Carpenter P W and Morris P J: *J. Fluid Mech.* **218** (1990) 171-223.
- [8] Endo T and Himeno R: *Proc. of 2nd Int. Symp. Turbulence & Shear Flow Phenomena* **1** (2001) 395-400.
- [9] Jeong J, Hussain F, Schoppa W and Kim J: *J. Fluid Mech.* **332** (1997) 185-214.
- [10] Choi H, Moin P and Kim J: *J. Fluids Mech.* **262** (1994) 75-110.
- [11] Endo T, Kasagi N and Suzuki Y: *Int. J. Heat and Fluid Flow* **21** (2000) 568-575.
- [12] Endo T and Himeno R: *Journal of Turbulence* **3** (2002) 007.
(<http://stacks.iop.org/1468-5248/3/007>)
- [13] Johansson A V, Alfredson P H and Kim J: *J. Fluids Mech.* **224** (1991) 579-599.
- [14] Gad-el-Hak M, Blackwelder W F and Riley J J: *J. Fluid Mech.* **140** (1984) 257-280.
- [15] Chong M S, Perry A E and Cantwell B J: *Phys. Fluids A* **2-5** (1990) 765-777.
- [16] Kasagi N, Sumitani Y, Suzuki Y and Iida O: *Int. J. Heat and Fluid Flow* **16** (1995) 2-10.
- [17] Kawamura K and Kuwahara K: *AIAA paper* 84-0340 (1984).
- [18] 姫野, 佐藤, 松本: 第 12 回数値流体力学シンポジウム講演論文集 (1998) 311-312.
- [19] Endo T and Himeno R: *Proc. of 3rd Int. Symp. Turbulence & Shear Flow Phenomena* **3** (2003) 965-970.

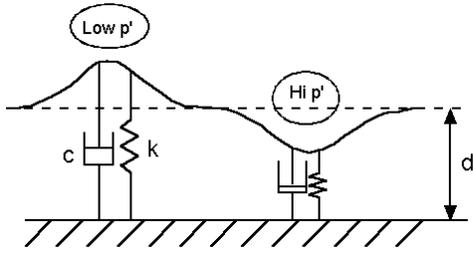


Figure 1: A schematic of the model for a compliant surface.

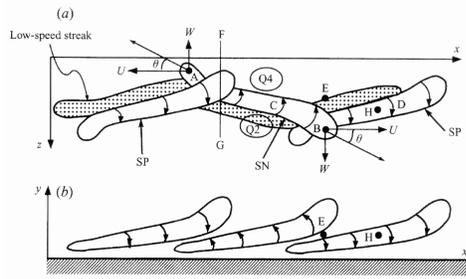


Figure 3: Schematic model of regeneration cycle proposed by Jeong *et al.*[9].

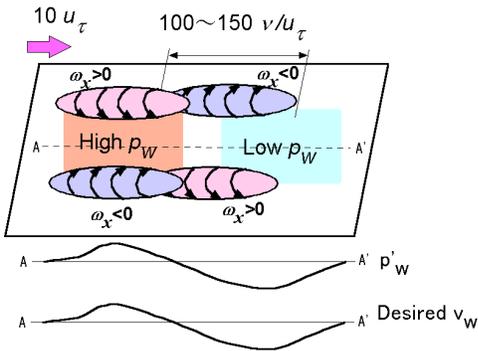


Figure 4: Schematic of flow field near streamwise vortices, and desired wall velocity of compliant surface to suppress the vortices.

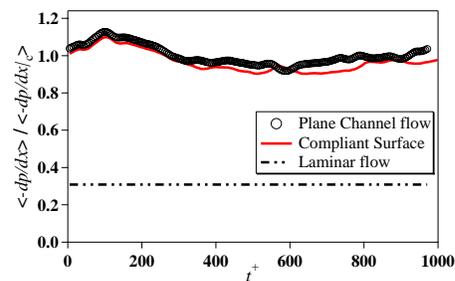


Figure 5: Time evolution of the normalized mean pressure gradient.

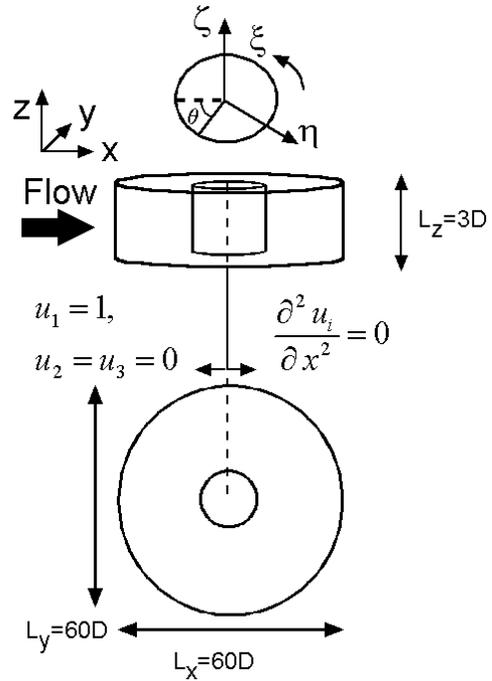


Figure 8: Schematic of calculation domain and coordinate system.

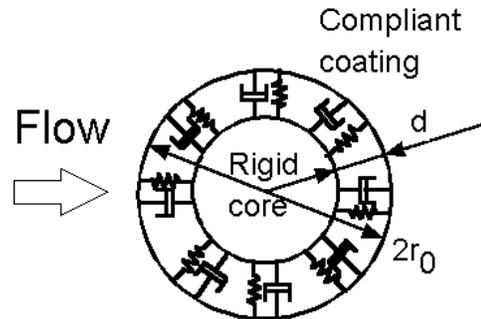


Figure 9: Schematic model for a compliant surface.

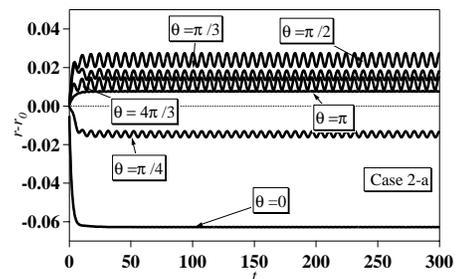


Figure 10: Time traces of wall deformation in case 2-a.

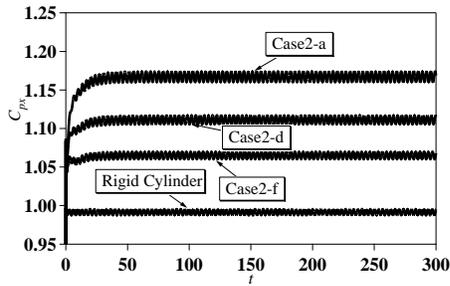


Figure 12: Time trace of the x - component of the pressure drag coefficient. The spring stiffness ω_0 is constant.

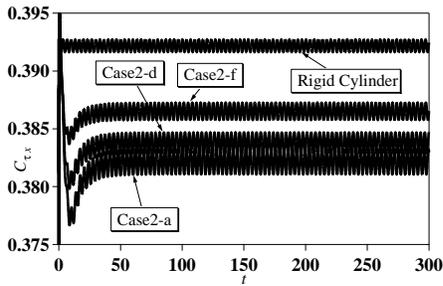


Figure 13: Time trace of the x - component of the friction drag coefficient. The spring stiffness ω_0 is constant.

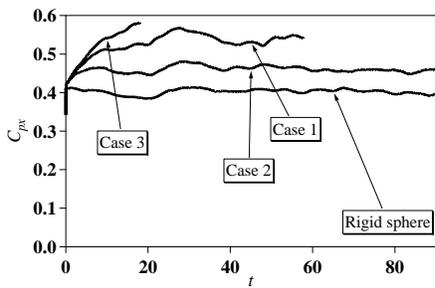


Figure 16: Time traces of x -component of the pressure drag coefficient.

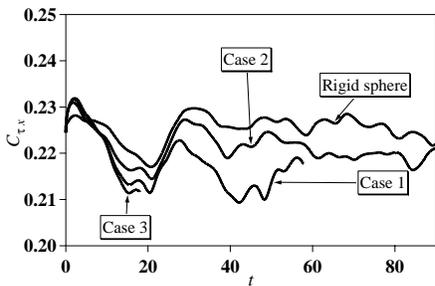


Figure 17: Time traces of x -component of the friction drag coefficient.