

多糖の染み出しを伴う変動する膜まわりの脈動流に関する数値シミュレーション

Numerical simulation on turbulent pulsating flow around a waving film with exudation of polysaccharide

○ 小山 修平 (京工繊大), 長峰 浩志 (三洋電機), 萩原 良道 (京工繊大)

Shuhei KOYAMA*, Hiroshi NAGAMINE**, and Yoshimichi HAGIWARA***

*Graduate school, Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki Kyoto 606-8585, Japan

**SANYO Electric Co., Ltd. Hyogo Pref, Japan

***Dept. of Mechanical and System Eng., Kyoto Institute of Technology

Direct numerical simulation has been conducted for pulsating turbulent flow around a waving film with the model of polysaccharide in order to examine the turbulence modification by the exudation of the biopolymer. The cluster models of beads, springs and dashpots are introduced near the film as representative of the entangled polysaccharide. An unsteady generalized curvilinear coordinate is used for transforming from waving boundary to flat boundary. The computational results show that hairpin vortices and streaks decrease during acceleration phase of pulsating flow. The hairpin vortices and the streaks increase during deceleration phase. Both the waving film and the cluster models contribute to the drag reduction in pulsating turbulent flow by reducing the number density of the hairpin vortices.

1. 緒言

合成高分子のポリエチレンオキサライド(PEO)やポリアクリルアミドのみならず、ある種の天然高分子を水乱流中に微量添加することで、壁面摩擦抵抗が大幅に低減することが知られている。著者らは、海洋環境保全の観点から、海洋生物由来の天然高分子の抵抗低減メカニズム解明と応用を検討している。

このような天然高分子のうち、ある種の紅藻類から抽出される多糖であるカラギーナンが抵抗低減に有効であることが、Hoyt により実験的に示された¹⁾。著者らは、この多糖のもつ本来の目的に着目した。すなわち、この紅藻類が激しい潮流をうけても生き延びるために、多糖を分泌にして、潮流による葉状体表面の摩擦抵抗低減を行っていることが考えられる。また、葉状体のしなやかなさの効果も考えられる。しかしながら、そのメカニズムは解明されていない。

そこで本研究では、カラギーナンを模擬するモデルを作成する。次にしなやかに動く葉状体を模擬し、これを含む脈動する水乱流の直接数値シミュレーションを実行する。得られる結果から多糖の分泌と葉状体の変動が周囲の水乱流に与える影響を調べる。

2. 計算方法

2.1 変動する膜に関する仮定 同一の葉状体が流れに直角方向に複数枚並び、同じ形に変形すると仮定した。つぎに、葉状体表面に微小な凸凹はなく、流れにより変形した葉状体は常に2次元正弦波状の形状を有するとした。ただし、その振幅は小さいものの時刻と共に変化する葉状体の変形は主として表面と裏面との圧力差により生じると仮定した。物理空間のみ計算領域として、葉状体の両面を含む領域を考えた。

2.2 計算領域と格子の設定 前報²⁾³⁾と同様に、デカルト座標(x, y, z)から一般化座標(ξ, η, z)への変換を行い、物理領域をチャネル流れに変換した。座標系はチャネル下壁上の原点から流れ方向に ξ 軸、壁垂直方向に η 軸、スパン方向に z 軸を設定した。計算領域は主流方向とスパン方向に流れを周期的とするために、各方向に $2\pi h \times 2h \times \pi h$ とした。そして、この領域を各方向にそれぞれ $64 \times 96 \times 64$ 点の格子点に分割した。本研究では摩擦速度 u_τ とチャネル半幅 h で定義される流れ場のレイノルズ数を150とした。境界条件には、壁面上での境界条件は速度成分には滑りなし条件を、圧力変動成分にはノイマン条件を課した。また主流方向、スパン方向は速度成分、圧力成分ともに周期境界条件を課した。

2.3 脈動乱流 海水流の空間平均速度が時刻とともに

に変化することを考慮し、主流が周期的に加速及び減速を繰り返すように、Navier-Stokes 式の平均圧力勾配を式(1)のように変動させるものとした。

$$-\partial p^+ / \partial \xi^+ = 1 - B^+ \cos(2\pi t^+ / T_p^+) \quad (1)$$

本計算では、変動の周期 $T_p^+ = 600$ 、変動の振幅 $B^+ = 750$ とした。ここで、Scotti and Piomelli⁴⁾とのパラメータの比較をTable.1に示す。 ω^+ は脈動の無次元振動数、 Re_s はストークス長さと中心流速の変動量の振幅で定義されたレイノルズ数である。Scotti and Piomelli らと比較すると、 Re_s は約1/4であるが、 ω^+ はほぼ等しい。

Table.1 Parameters of pulsating flow

	Present	Scotti and Piomelli
ω^+	0.0105	0.01
Re_s	46	200

2.4 スキーム 支配方程式には、連続の式とビーズのストークス抗力の反力が流体に作用するNavier-Stokes式の解法に対して、対流項の空間微分には補間法を用いた2次精度中心差分⁵⁾を採用した。時間発展には、部分段階法を用いた。

3. クラスタモデル

PEOを模擬するために開発した、ビーズ・非線形バネ・ダッシュポットで構成されるクラスタモデルを改良して用いた。

3.1 クラスタモデルの初期設定 等間隔に ξ 方向に8個、 η 方向に2個、 z 方向に16個、全部で256個のビーズをつなぎ、1つのクラスタモデルとした。これを葉状体上下面共に主流方向に16列、スパン方向に4列の片面64個、上下面合計128個敷き詰め、全面を均等に覆った。無次元ビーズ径は0.6、無次元バネ定数は0.2、ダッシュポット係数は梶島の結果⁶⁾をもとに 3.3×10^{-4} とした。

3.2 モデルの再配置 クラスタモデルが乱流によって壁から主流へと輸送されると、壁近傍に存在するクラスタモデルの濃度が減少してしまい、常に表面が分泌した多糖で覆われている実際の藻類の葉状体と異なる。そこで、クラスタモデルの臨界高さを設け、その高さに到達したクラスタモデルをモデルの低濃度領域に再配置させることにより、多糖の染み出しを模擬した。再配置条件として、臨界高さに達したクラスタモデルは初期形状を与えて、クラスタモデルの低濃度の領域に移動させた。本研究では注目する領域が壁にごく近い領域であることから、臨界高さを $\eta^+ = 10$ とした。

4. 計算結果及び考察

4.1 平均流速分布 3.2により流れが加速及び減速していることを考慮して、以下の統計量の採取には、流れが加速している時間(A)、流れが減速している時間(D)の条件を設けた。時間(A)、(D)いずれの場合においても、固定壁と比較して、変動壁の影響は確認できなかった。さらにクラスタモデルを添加することにより、壁近傍からバッファ層にかけて、平均速度が低下した。(図略)

4.2 乱れ強さ分布 時間(A)において、計算領域全体で全方向の乱れ強さが低下した。変動壁により、バッファ層で主流方向乱れ強さが、固定壁の場合よりも低下した。クラスタモデルの添加によって、変動壁のみの場合よりも、壁近傍で全方向の乱れ強さが低下した。(図略) また時間(D)において、計算領域全体で全方向の乱れ強さが上昇した。変動壁による影響は確認できなかった。クラスタモデルの添加によって、変動壁のみの場合と比較して壁近傍で全方向の乱れ強さが低下した。(図略)

4.3 せん断応力分布 Fig.1に時間(A)における、せん断応力分布を示す。固定壁で、クラスタモデルを添加しない場合、バッファ層でレイノルズ応力の低下がみられる。変動壁は固定壁と比べ領域全体で粘性応力、レイノルズ応力の低下が確認できる。クラスタモデルの添加によって、変動壁のみの場合よりも粘性応力、レイノルズ応力が低下している。他方、時間(D)において、流れが減速することにより、バッファ層でレイノルズ応力の上昇がみられた。変動壁による粘性応力、レイノルズ応力の低下が、壁近傍で確認できた。クラスタモデルの添加によって、変動壁のみの場合より壁近傍で粘性応力が低下した。(図略) すなわち変動する膜と、多糖を模擬するモデルは摩擦抵抗低減に有効であると考えられる。

4.4 流れ場の乱流構造 Fig.2(a),(b)にそれぞれ時間(A),(D)において、Jeongらが提案した手法⁷⁾⁸⁾で抽出した代表的なヘアピン渦を示す。クラスタモデルは添加せず、壁は変動している。灰色の領域はヘアピン渦を示している。(a),(b)を比較すると、時間(A)では、ヘアピン渦の数密度が低く、逆に時間(D)では高くなっていることが確認できる。これは、Scotti and Piomelliの結果と定性的に一致する。これが、上記の乱れ強さとレイノルズ応力の変化の原因であると考えられる。

4.5 壁面せん断応力 Fig.3にクラスタモデルを含む変動壁の場合の壁面せん断応力を示す。図中の黒色は壁面せん断応力の高い領域、白色は低い領域、点はビーズを示している。このとき流れは加速していた。クラスタモデルを添加しない場合(図略)と比較して、壁面せん断応力の高い領域が減少していた。Fig.4にFig.3の(y,z)断面の一部($\eta^+ = 60, z^+ = 117$)を示す。黒色が高速ストリーク、白色が低速ストリーク、灰色がビーズを示す。図中右側において、高速ストリークの下向きの移動、すなわちsweepがクラスタモデルによって妨げられている。この減衰は任意の時刻で確認できた。これがクラスタモデル添加によって、壁面せん断応力が低下する原因であると考えられる。

5. 結言

紅藻類の葉状体を正弦波状に変動する膜により、海中の水流を脈動乱流により、葉状体から染み出す多糖をビーズ-パネ-ダッシュポットクラスタモデルによりそれぞれ模擬した場合の数値シミュレーションを行った。

その結果、脈動乱流において、加速時は流れが安定し、減速時では不安定になると考えられる。また、脈動乱流中において、変動壁とクラスタモデルは摩擦抵抗低減に有効であることが明らかになった。

6. 謝辞

のとじま水族館の桶田俊郎氏には、ケルプの観察を許可して下さい、またその生態について説明して頂きました。記して、謝意を表します。

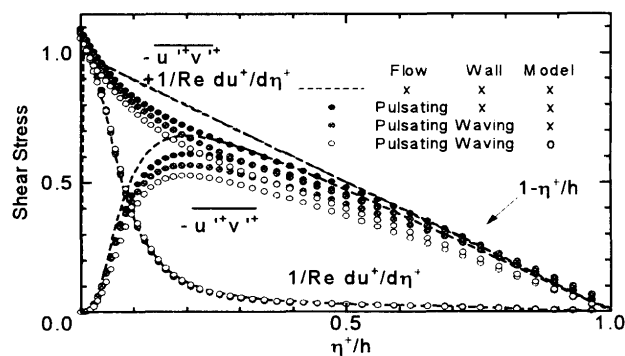


Fig.1 Shear stresses during acceleration phase

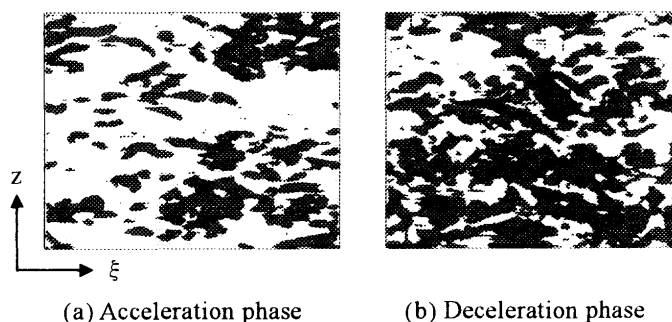


Fig.2 Hairpin vortices

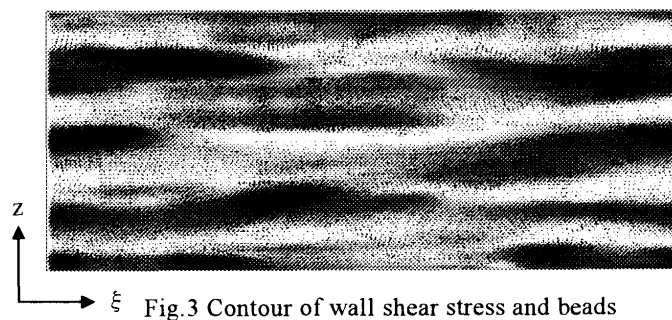


Fig.3 Contour of wall shear stress and beads

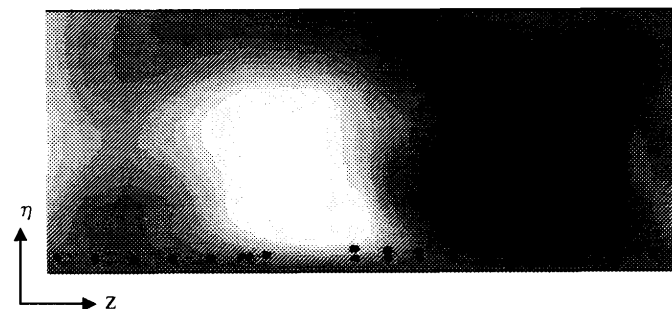


Fig.4 Low-speed and high-speed streak and beads

7. 参考文献

- 1) Hoyt, J.W., Trend Bio Tech., Vol.3 (1985) 17-21.
- 2) 瀧, 他 2 名, 流体力学会年會講演論文集(2001)115-116.
- 3) Hagiwara, Y et al., J. Turbulence(2002) 1-17.
- 4) Scotti, A and Piomelli, U., Phys Fluids, Vol.13(2001), 1367-1384.
- 5) 梶島, 機論(B 編), Vol.60(1994), 2058-2063.
- 6) 梶島, 三宅, 機論(B 編), Vol.64(1998), 3636-3643.
- 7) Jeong, J., et al., JFM, 285(1995), 69-94.
- 8) Jeong, J., et al., JFM, 332(1997), 185-214.