

II-332

高レイノルズ数における波状底面上の振動流の特性についての考察

北海道大学大学院	学生員	渡部 靖憲
北海道大学大学院	学生員	折橋 恒春
北海道東海大学	正 員	浜中建一郎

1. はじめに

浅海域では、波の運動によって形成された砂漣上をある規模以上の波が通過するとき、剥離渦を伴った非常に複雑な流れとなる。このような非定常流れはどのような点をもって乱流と見なすことができるのかを調べようとしたのが本研究のきっかけである。砂漣上の振動流については層流境界層理論によって解かれたものやその線形不安定性について論じられたものなどいくつかの研究がある。しかし、前述したような流れは強非線形場で発生するため、現時点では実験や数値計算に頼るわざるを得ないようである。著者らは、振動流及び波動場における砂漣上の流れについて数値解析を用いて研究を進めてきた。最終的にはその流れの不安定性について考えていきたいが、水平床上で乱流に遷移するような不安定性の他に、波状底面では発生した剥離渦が影響して別の不安定性が現れるだけでなく、数値計算の打ち切り誤差による数値不安定に対しても考える必要があり非常に難しい問題と思われる。そこで本研究は、この課題の第一歩として、直接法による数値解より高レイノルズ数のもとにおける波状底面上の剥離構造など流れ特性の違いを考察することにする。

2. 計算内容

数値計算は、渦度方程式と流れ関数に対するポアソン方程式を支配方程式とし、有限差分法によって行った。また全てのパラメータを砂漣の波数 k^* と角振動数 σ^* で無次元化し、等角写像を用いて砂漣の形状に適合した座標系を採用した。境界条件として、計算領域上縁で水平振動流速度、ていめん non-slip 条件を与え側方境界条件は周期境界条件を用いている。計算スキームとして空間方向に対してスペクトル法、時間方向に対して A. D. I 法を採用した。これらのスキームを組み合わせることにより精度よく安定性のよい計算を行うことが可能となり、かなり大きなレイノルズ数まで解くことができた。計算を決定する無次元パラメータを次に示す。砂漣波形勾配 $\varepsilon (= a^* k^*)$ 、流速振幅 $\alpha (= A^* k^*)$ 、粘性係数 $\nu (= k^{*-2} / \sigma^* \nu^*)$ 。ここで "*" は有次元量を示す。また砂漣の波長 l^* を代表長さとしてレイノルズ数を算定する。

次に、最初の近似として砂漣形状に沿って層流状に流れるものを平均流と考えれば、その乱れは高波数成分として現れる可能性がある。今、考える座標系は砂漣の波長方向に完全に周期的であり、この砂漣形状に沿う軸に対して波数方向に流れ関数及び渦度のフーリエスペクトルをとり、剥離や不安定性を空間的に考察していく。

3. 結果と考察

図1, 図2は、それぞれ $Re=19739$, $Re=197392$ の時の砂漣上の流れ関数と渦度の等高線を表している。これらの位相は、流速の減速期のものであり (a); $5T/16$, (b); $6T/16$, (c); $7T/16$ で両者とも $\varepsilon=0.3$, $\alpha=\pi$ である。図1の方は図2と比べて前縁剥離渦の長さも長く、剥離剪断層も厚い。また図1の(c)の位相で砂漣上に再付着し、剥離渦の下にあった逆流層が空間的に揺らぎ、新たな渦が発生しているのがわかる。レイノルズ数の大きい流れを示す図2では、再付着した辺りで乱れが生じ、さらに下流側の点で新たに乱れを発生している様子が分かる(b)。さらに、これらの2つの点で細かな強い渦度がさらに発達している(c)。図3は $Re=197392$ で ε を変化させた時の位相(c)

での底面近傍での流れ関数のスペクトルを示している。砂漣の波高の増大に伴い次第に高波数成分が卓越し、 $\varepsilon = 0.3$ では基本波数と同レベルの高波数成分が発達している。また最小波数成分の64次の項に有意な値が入っているが、この値がある一定値以上になるとaliasingによって起こる影響が大きくなり不適当な計算となる可能性がある。今回の計算ではその成分がまだ絶対的には小さく、そう大きなaliasingの影響は受けていないと思われる。次に図4は、レイノルズ数に対する流れ関数の波状底面付近($\varepsilon = 0.3$)のスペクトルの違いを示している(位相(c))。それぞれ受け取るエネルギー量が違うため絶対的には比較できないが、一般に小さなレイノルズ数では基本波数成分が中心であり大きなレイノルズ数では高波数成分が卓越しさらにその波数は幾つかのピークをもっている。図5は、流速の減速期における波状底面付近のスペクトルを位相毎に表したものである。図2と対応させてみると顕著な剥離の発生とともに高波数帯でスペクトルが徐々に増加し、いくつかの波数にかたまりピークをもってくる。さらに時間の経過とともにこの波数のかたまりが大きく発達し広い波数帯にスペクトルをもつようになる。

4. 結論

本研究で採用した数値計算法によりかなり大きなレイノルズ数に対しても計算することができた。レイノルズ数の違いによる波状底面上の振動流の流れの構造の違いについて議論できた。波数方向のスペクトルをとることによって剥離から不安定性が現れる過程を評価できる可能性がある。今後、特定の波数帯に対応する渦や不安定性の特徴や周波数に対するそれらについても調べていく必要がある。

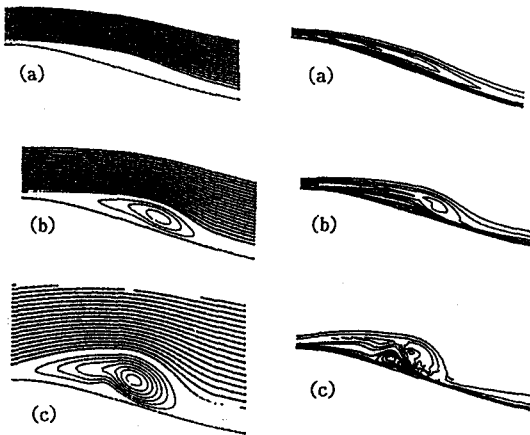


図1 流れ関数(左)と渦度(右)の投稿線
($Re=19739$, $\varepsilon=0.3$)

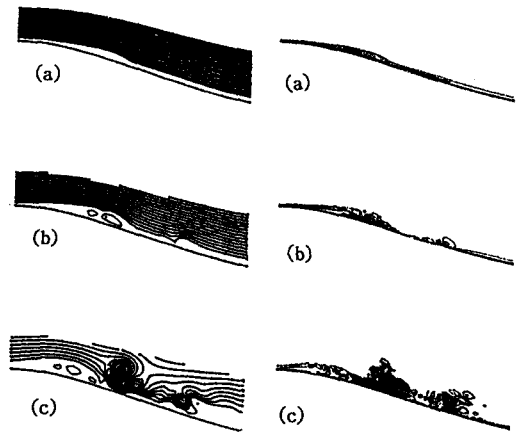


図2 流れ関数(左)と渦度(右)の投稿線
($Re=197392$, $\varepsilon=0.3$)

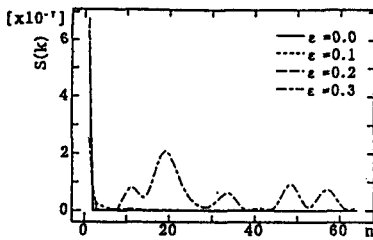


図3 砂漣波高の変化に対する流関数スペクトル
($Re=197392$, 位相: $7T/16$)

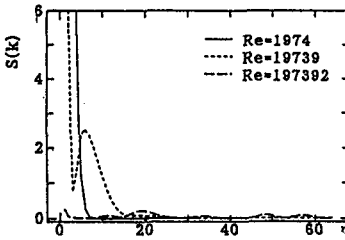


図4 レイノルズ数に対する流関数スペクトル
($\varepsilon=0.3$, 位相: $7T/16$)

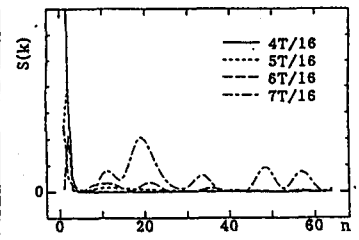


図5 位相の変化に対する流関数スペクトル
($Re=197392$, $\varepsilon=0.3$)