

孤立波動下層流底面境界層の特性

東北大学大学院 学生会員 ○田中 創
 東北大学大学院 フェロー会員 田中 仁
 東北大学大学院 正会員 Suntoyo
 東北大学工学部 正会員 山路弘人

1. はじめに

波や流れ等の外力によって沿岸域に引き起こされる底質移動とそれに伴う海浜地形の変化を解明することは非常に重要であり、このために波動下での底面近傍における流速場や底面せん断力を正確に見積もることが必要とされる。これまでに行われた底面境界層に関する研究は正弦振動流を対象としたものがほとんどであった¹⁾。しかし、静水域に入射する孤立波状の波動下においては、急激な加速効果により正弦規則波動とは全く異なる特性を示すものと考えられる。そこで、本研究では、層流時の孤立波動下における底面境界層特性を数値解析により求め、底面境界層特性について検討を行った。

2. 数値計算手法

(1) 基礎方程式

ここでは、流れが層流であるとし、さらに振動流を対象とするため、基礎方程式は下記の線形化された層流境界層方程式となる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial t} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

ここで、 u : 境界層内流速、 U : 境界層外縁流速、 t : 時間、 z : 鉛直座標である。

(2) 境界層外縁流速

式(1)において、右辺第一項の圧力勾配により流体運動が駆動される。孤立波動下においては、次式により境界層外縁流速が与えられる。

$$U = U_c \operatorname{sech}^2(t^*) \quad (2)$$

ここで、 U_c : U の最大値であり、 t^* は次式で与えられる無次元時間である。

$$t^* = \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} \sqrt{g(H+h)} t \quad (3)$$

以下の数値計算では式(2)による外縁流速の他に、浅海域において前傾化した孤立波を想定し、式(4)による流速も与えた。

$$\left. \begin{aligned} t^* < 0 \text{ で, } U = U_c \operatorname{sech}^2(\alpha t^*) \\ t^* > 0 \text{ で, 式(2)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

α の値を変化させることにより、波の立ち上がり部における波形が前傾化してくる。 $\alpha=1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ とした時の式(4)による計算結果を図-1に示す。 α の増加に伴い、波の前面の立ち上がりが顕著になる。なお、図中で $\alpha=1.0$ は孤立波による流速に対応する。

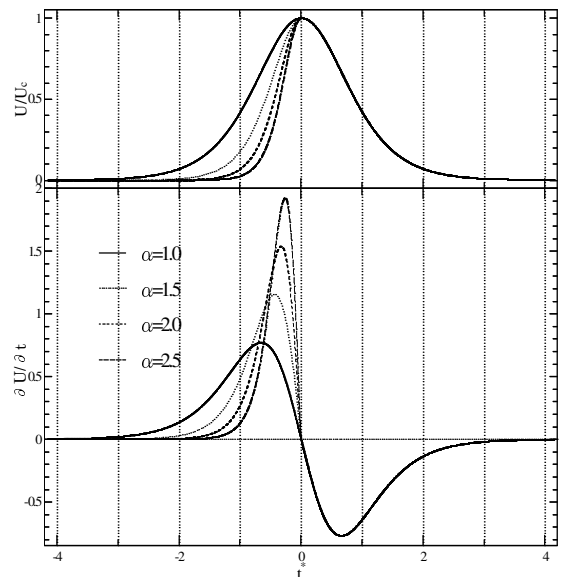


図-1 式(4)による流速波形と圧力勾配

図-1より波形が前傾化するに従い、圧力勾配の最大値の発現する位相が遅くなり、最大値が増大している様子が伺える。また、前傾化の立ち上がりが顕著な条件ほど、圧力勾配の最大値から0への低下が急速である。

(3) 数値解法

本研究においては式(1)を陽形式の差分法により解いた。鉛直方向には境界層外縁までの領域を100分割し、また、時間方向には $-4.174 < t^* < 4.147$ の範囲を7,200分割した。初期条件として、全域で流速をゼロとしている。

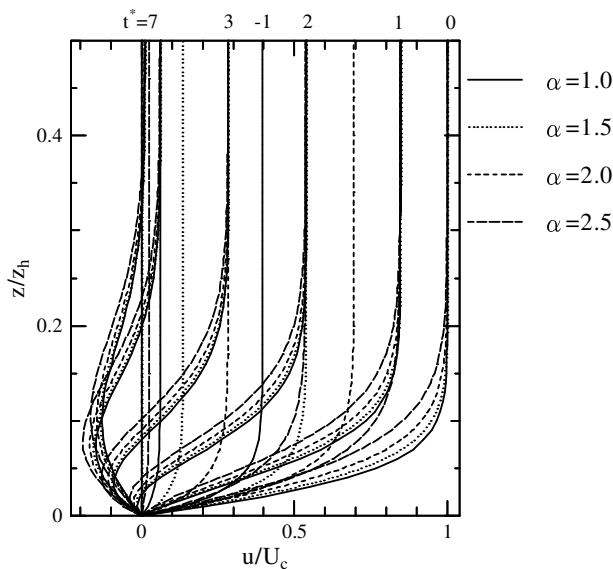


図-2 流速の鉛直分布

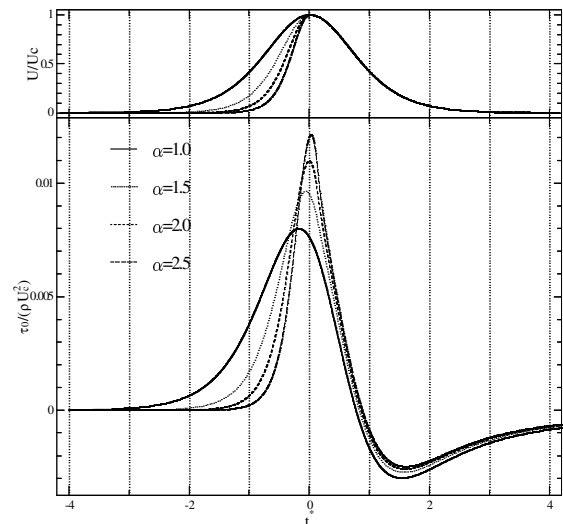


図-3 加速度とせん断力の変化

3. 計算結果

(1) 鉛直流速分布

式(4)に示した外縁流速波形時の流速分布図を図-2に示す。これは層流状態における波動下の鉛直流速分布図であるが、結果は層流状態における正弦波動下の流速分布とは大きく異なり、複雑な速度分布となっている。これは、今回対象とした波形が、正弦振動流における単純な圧力勾配と異なり、複雑な圧力勾配をしているためである。

正弦振動流の流速分布が半周期ごとに対称的な値を示すのに対し、孤立波などの加速度効果を持つ波の流速分布は、流速が大きくなるにつれ徐々に正方向への流速分布が見られるが、最大流速を観測した後の流速分布は、ほぼ負の方向に流速分布が見られる。これは最大流速を観測した後急激に圧力勾配が減少するため、圧力勾配がゼロに収束する時点でも、底面近くでは依然負の流速値が見られる。

(2) せん断力の時間変化

図-3は底面せん断力の変化を示したものである。なお、 $\alpha=1.0$ の孤立波条件での計算結果が、Keulegan²⁾によって示された孤立波下における底面せん断力の厳密解と良い一致を見せていることが確認されており、今回行った数値計算の精度の信頼性が示される。

ここで、図-3から、静水域に入射する孤立波と今日まで広く研究されてきた正弦規則波との大きな相違を見ることができる。正弦波動下における底面せん断力が最大値・最小値とも同一の値を取り対称的である

のに対し、孤立波下における底面せん断力は最大値に比べ最小値が非常に小さい値を示している。この現象は、波形の前傾化前傾化が顕著になるにつれ大きく見られるようになってきていることから、加速度効果によって引き起こされる特有の現象であると考えられる。

また、底面せん断力の最大値は波形の前傾化に引かれるように現れている様子が伺える。底面せん断力の最大値は前傾化が顕著になるほど大きくなるが、最小値は前傾化が小さいものの方が小さな値を示している。

4. まとめ

本研究では、孤立波動下層流底面境界層の特性を検討するために、境界層方程式を用いた数値計算を行い、流速分布・底面せん断力を求めた。さらに加速度の影響を示すため、波形を前傾させた条件についての解析も試みた。加速度効果が大きいほど、底面せん断力は特有の変化を示し、流速分布は急激な圧力勾配の現象により正方向に大きく増加した後、負の値を示す結果となった。このことから、底面せん断力は最大流速を観測した後も、流速波形は常に正であるにもかかわらず、負の値を示すことがわかった。

参考文献：

- 1) Fredsoe, J. and Deigaard, R.: Mechanics of Coastal Sediment Transport, World Scientific, pp.17-33, 1992.
- 2) Keulegan, G.H.: Gradual damping of solitary waves, US Department of Commerce, National Bureau of Standards, Res. Paper, RP1895, Vol.40, pp.487-498.