

砕波下の流速プロファイルと平均流遷移について

Instantaneous and mean velocity profile under breaking waves

北海道大学工学部 ○学生員 梶野英之 (Hideyuki Kashino)
 北海道大学工学研究科 正員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)
 北海道大学工学研究科 正員 佐伯 浩 (Hiroshi Saeki)

1. はじめに

線形波に対する緩勾配方程式や弱非線形弱分散性を示す波に対する Boussinesq 方程式等水深積分型波動方程式モデルによる波浪計算は広く使われている。これらのモデルに対する砕波モデルもまた数多く提案されているが、基本的にはポテンシャルフローの仮定から導出されたこれらの波動モデルは砕波後の流速を再現するものではなく、多くの砕波モデルは波浪の波高を予測するための適当な減衰ファクターを決定するためのものと考えてよい。実際には砕波後に発生する大規模な乱流構造がその流体プロファイルを大きく変化させるため、波動方程式モデルで決定されるプロファイルとは大きく異なると考えられる。また、多くの砕波モデルで決定される波高の減衰=エネルギー減衰との考え方は実際には異なる。すなわち、波高の低下に伴うポテンシャルエネルギーの低下は平均流速の乱れに関するエネルギーに変換され最終的にエネルギー散逸へと遷移するが、連続して起きる砕波に対しては定常的に乱れが生成されており、上の仮定は主流を変化させうる乱れもまた減衰項として考えられていることになる。この理由から、流速を得るために波動方程式モデルを使用した場合、深刻なエラーが発生する可能性がある。例えば、底質輸送を予測するために、底面近傍や砕波帯での計算で得られる流速は確実に本来のものでない。Eluaggar と渡辺 (1999) は Nwogu (1993) の Boussinesq モデルを拡張し、回転性を考慮したモデルを提案している。しかしながら乱れエネルギーの評価の段階でやはり仮定された低次の流速変動をベースをすることが必要であり、適切な乱れエネルギー生成が評価されているとは考えにくく、在来の砕波モデルを合理的に高次まで考慮して導入したモデルと位置付けられるだろう。

共著者ら (1999) は、砕波の三次元流速場を計算する LES を提案しており、乱れを考慮した grid-scale 流速を得ることが可能である。本研究は同一の LES により砕波後の乱れを考慮した grid-scale 流速プロファイル及び水深積分流速の遷移を詳細に調査し、前述した水深積分型波動方程式モデルとの比較を通して、高次モードのモデル化について論ずるものである。

2. 波動方程式モデルの流速プロファイル

種々の波動方程式モデルが提案されているが、ここでは微小振幅波、Mei 及び Nwogu の Boussinesq モデルについて比較を行う。

微小振幅波の水平及び鉛直流速はよく知られているように

$$u = \alpha \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma t)$$

$$w = \alpha \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \sin(kx - \sigma t)$$

で書ける。ここで α : 流速振幅, k : 波数, h : 水深, σ : 角周波数である。ここで 1, 2 を水深積分すると

$$\bar{u} = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 u dz = \frac{\alpha}{kh} \cos(kx - \sigma t)$$

$$\bar{w} = \frac{\alpha}{kh} \frac{\cosh kh - 1}{\sinh kh} \sin(kx - \sigma t)$$

$\bar{u}, \bar{w}$ は u, w を使って

$$\bar{u} = \frac{\alpha}{kh} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh}$$

$$\bar{w} = \frac{\alpha}{kh} \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh kh - 1}$$

Mei の Boussinesq モデルでは速度ポテンシャルの z に関するべき乗に展開し以下の流速プロファイルをベースに水深積分量に対する方程式を構成する。

$$\mathbf{u} = \nabla \phi = \mathbf{u}_0 - \frac{1}{2}(z+h)^2 \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}_0)$$

であり水深積分

$$\bar{u} = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 u dz = \frac{\alpha}{kh} \cos(kx - \sigma t)$$

一方、鉛直流速は

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} = -(z+h) \nabla \cdot \mathbf{u}_0$$

Nwogu はオイラー式分散項が修正された Boussinesq モデルを導出した。ある任意の点での流速を使い流速分布は以下のように書述できる。

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_a + \frac{1}{2}(z_a^2 - z^2) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}_a) + (z_a - z) \nabla(\nabla \cdot (h\mathbf{u}_a))$$

$$w = -\nabla \cdot (h\mathbf{u}_a) - z \nabla \cdot \mathbf{u}_a$$

上式を同様に水深積分で表すと

$$\bar{\mathbf{u}} = \bar{\mathbf{u}} + \left(\frac{(h+z)^2}{6} - \frac{z^2}{2} \right) \nabla(\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}) + \left(\frac{h+\eta}{2} - z \right) \nabla(\nabla \cdot (h\bar{\mathbf{u}}))$$

$$w = -\nabla \cdot (h \cdot \bar{\mathbf{u}}) - z \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}$$

3. 数値計算法

三次元 LES による計算は共著者ら (1999) と同一の計算法に従って行われた。結果として得られた grid-scale 流速は線形内挿により鉛直軸に割あてられる。対象碎波は、相対碎波波高 $H/d = 0.58$ 、周期 2.75、水底勾配 1/20 の巻き波碎波であった。

ここで、水深積分量は数値結果から計算され、上式の u , v にその平均量が代入され、それぞれの流速プロファイルが決定される。なお上の解析解は全てポテンシャル流速の水深平均なのに対して与えた平均流速は、回転流速がその鉛直勾配に関しては議論可能と考える。

4. 結果

図 1 は碎波 T18 位相前の水平及び鉛直流速分布に対する数値の結果である。この位相では底面境界層外では数値解も殆どポテンシャルフローと考えて良く三つのモデルは数値解のプロファイルを比較的良く近似していると考えられる。波峰前面では微小振幅波モデルが過小評価となることも特徴の一つである。一方鉛直流速は、この領域では微小振幅波が長波のプロファイルを示すため鉛直流速は衰えないが、Boussinesq モデルは定常的に妥当な鉛直流速を表現している。

図 2 では碎波点における同様な図である。依然ポテンシャル領域と仮定して良いこの領域では、前図と定常的に類似した傾向を示す。しかしながら、鉛直流速は Nwogu のモデルは適切な傾向を表しているのがわかる。Nwogu の修正分散項がこの差異の理由として考えられる。

図 3 はジェットの着水層における同様な図である。ジェットの着水と同時に碎波前まで良い近似をしていた。水平流速においてもその近似度は大幅に低下する。特にその鉛直勾配は数値解とモデルで大きな差異があらわれる。また波峰部での複雑な鉛直流速勾配は、2 次オーダーの解析解では再現し得ないことを表している。さらに T/8 位相

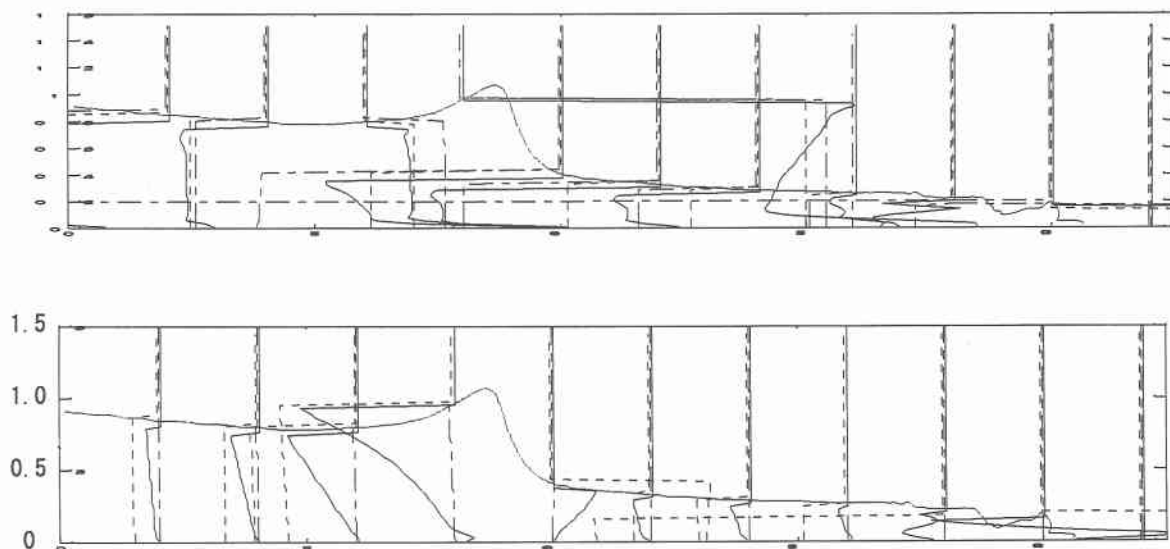


図 1 碎波 T/8 位相前の流速分布 (上: 水平流速 下: 鉛直流速)

経過後、同様に水平、鉛直流速共に全てのモデルは定性的にも数値解の流速プロファイルを再現しないことがわかる。(図4)着水と同時に回転流れが支配的になるので、これらのポテンシャルフローベースのモデルの適用範囲外となり実際の流速分布を再現しないことは自明ではあるが、そのプロファイル自体

大きく異なるのでEluaggarと渡辺(1999)のようなBoussinesqモデルのオーダーと同様な鉛直プロファイルを使って乱流モデルを採用しても適当なレイノルズ・ストレスの再現できないことを示唆している。

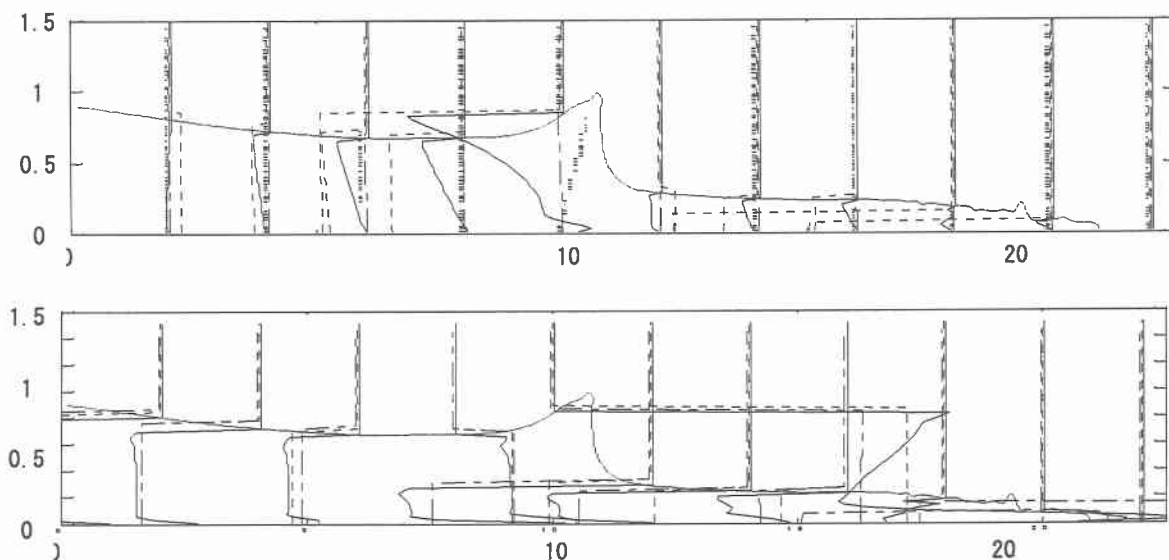


図2 碎波位相の流速分布(上:水平流速 下:鉛直流速)

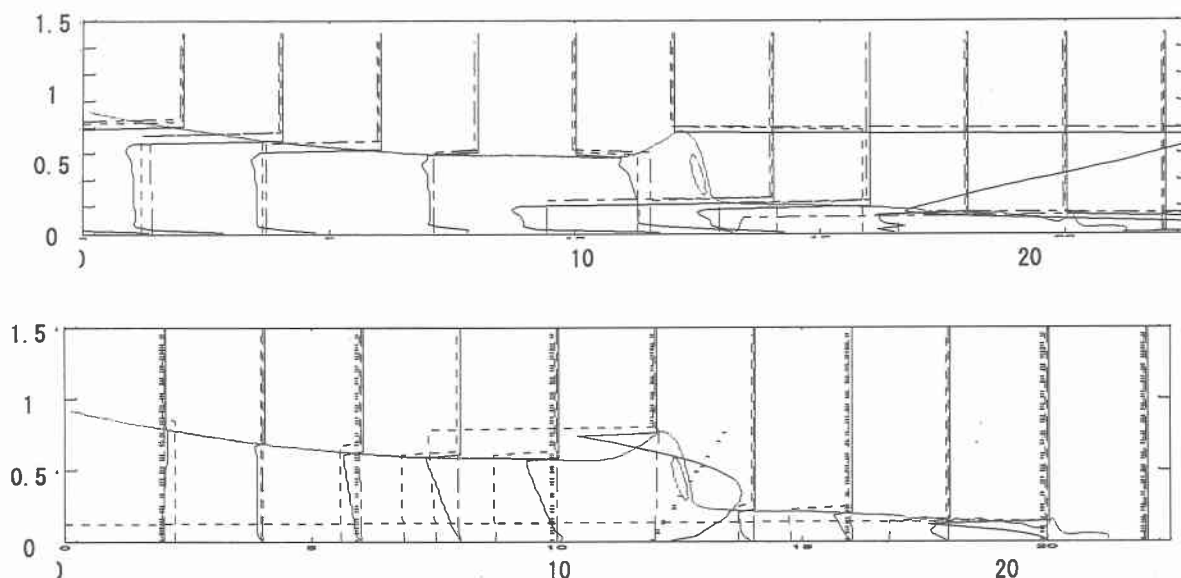


図3 着水位相の流速分布(上:水平流速 下:鉛直流速)

- Lesによる流速分布
- · — · — Nwoguによる流速分布
- Meiによる流速分布
- ■ ■ ■ ■ 微小振幅波による流速分布

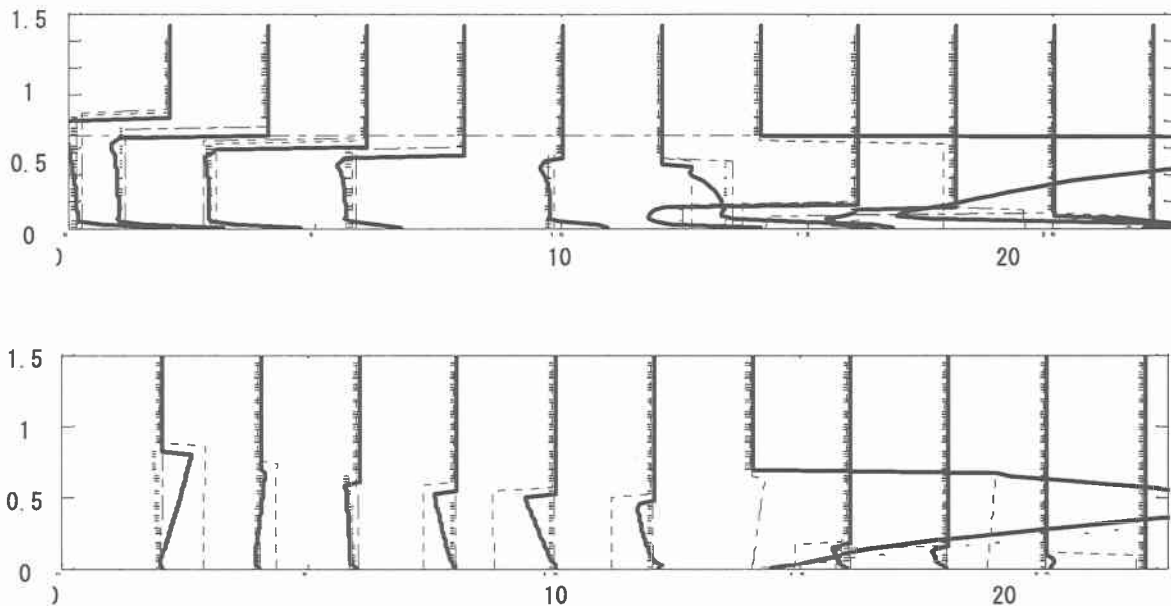


図4 着水後T/8位相後の流速分布（上：水平流速 下：鉛直流速）

- Lesによる流速分布
- - - - - Nwoguによる流速分布
- Meiによる流速分布
- . - . - 微小振幅波による流速分布

5. 結論

LESによる数値計算結果を用い、水深積分型波動方程式の流速プロファイルに対する近似度を検討した。砕波前まではBoussinesqタイプのモデルは定性的に良好な近似を示すが、砕波直後その流速プロファイルは数値解と大きく異なる。この結果は、波高を減衰させるための砕波モデルを適用したとしても流速の絶対値及び勾配の両者とも実際の値を再現しえないため、この領域の代表流速としてこれらのモデルの流速を使用するのは非常に危険であることを表している。この領域の鉛直プロファイルは z の2乗オーダーでは再現し得ないため、乱流モデルの適用以外にも、さらに高次のプロファイルを持つモデルが必要である。

6. 参考文献

- ・Zakaria A Elnaggar, 渡辺 晃, (1999): 砕波帯・遡上域に可能なBoussinesq型波動・乱流モデルの提案, 海岸工学論文集, 第46巻, pp176-180
- ・渡部 靖憲, (1998): 砕波の三次元Large Eddy Simulation, 海岸工学論文集, 第45巻, pp146-150
- ・Okey Nwogu, (1993): Alternative Form of Boussinesq Equations for Nearshore Wave Propagation, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 119, pp618-638