

混入気泡が碎波乱流に及ぼす影響

北海道大学工学研究科 ○学生員 中島康晴 (Yasunari Nakajima)
北海道大学工学研究科 正員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

碎波はジェットに着水、再着水を経て大量の気泡を海に混入させると同時に、強い乱れを発生させる。この碎波乱流中で混入気泡はさらに流体を攪乱し、新たな乱れを誘発すると同時に浮力による傾圧効果により、流れを変化させ、乱流構造を変形させると考えられる。また、乱流の中に巻き込まれた気泡は、乱流中の渦内に捕捉され、浮上することなく長時間海中に滞留することが知られている。一方沿岸環境の側面から、碎波による混入気泡は大気中の酸素、二酸化炭素等の気体の海中への輸送を媒介し、海中の生態系へ重要な役割を果たしている。海面と比べ、大量に混入する気泡群の表面積は著しく大きく、気体を海水の大きな接触面を介してガス交換がなされるため、気泡の海中の滞留時間がガス交換率の重要なファクターになると考えられる。Watanabe et al.(2005)は、非線形格子粘性モデルを用いた3次元 Large Eddy Simulation により、碎波後の乱流渦構造を再現し、実験結果との検証により、モデルの妥当性を示している。また、渡部ら(2007)は、LES-Stochastic two-way モデルにより、波動境界層近傍の浮遊砂が混在するせん断な流れを解き、浮遊砂が乱流の発達、減衰に大きく寄与することを明らかにしている。

本研究は、碎波の3次元LESにLES-Stochasticモデルを導入し、混入気泡を模擬した球形粒子群を配置した碎波帯において粒子群が乱流構造や碎波過程に及ぼす影響を定量的に見積もり、力学的観点から気泡が混在する沿岸環境について議論しようとするものである。

2. 計算方法

2.1 計算概要

計算では沿岸部での碎波による混入気泡を議論している。そのため、波をクノイド波と仮定する。計算の流れは以下の通り。

1. 初期条件の設定
2. クノイド波による流速計算
3. 流速と粒子が相互に与える力を計算
4. 粒子が流速に与える影響と乱れの影響を加えて流速を更新
5. CIP法により流速、密度、乱れエネルギーを更新

計算ではまず海底面勾配、初期流速、粒子数等の初期条件を与え、クノイド波理論による波の計算を行う。

流速と粒子、乱れが相互に与える影響は次の式を用いて求める

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{u}_i \bar{u}_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \bar{A}_i$$

$$\frac{\partial q_{\tau}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{u}_j q_{\tau} = -\tau_{ij} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - S + C_{\tau} \frac{\partial}{\partial x_j} (\Delta \sqrt{q_{\tau}} \frac{\partial q_{\tau}}{\partial x_j})$$

$$+ \nu \frac{\partial^2 q_{\tau}}{\partial x_j \partial x_j} - \bar{U} \bar{A}_i$$

$$A_i = a \{ u_i(X^o) - v_i \} + b \frac{du_i(X^o)}{dt} + cg$$

一つ目の式は流体の運動方程式で、 τ が乱れの流速に与える影響を、 A が粒子の流速に与える影響を表している、二つ目の式は乱れエネルギーの輸送方程式である。三つ目の式は粒子が受ける力をあらわした式であり、これはバゼット項を無視したBB0方程式であり、その係数は以下のようになる

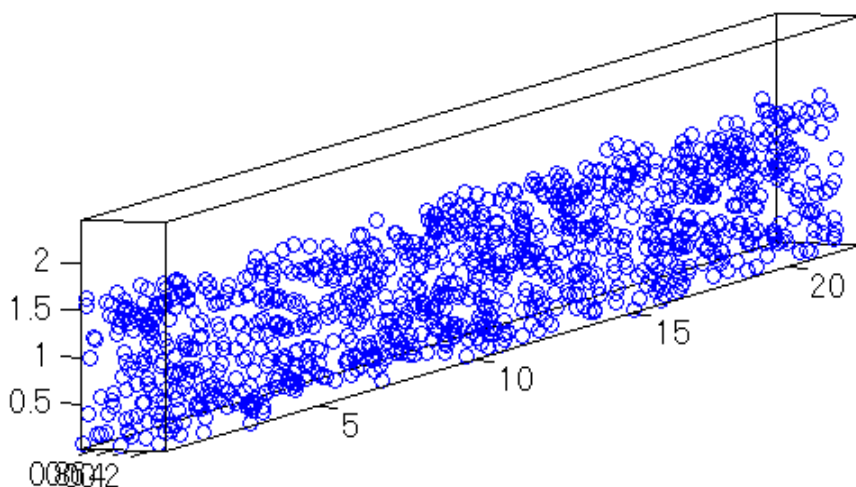


図-1 粒子位置の初期条件。

$$a = \frac{36\omega}{d^2 f 2\rho_p + \rho_f} \quad b = \frac{3\rho_f}{2\rho_p + \rho_f} \quad c = \frac{2(\rho_p - \rho_f)}{2\rho_p + \rho_f}$$

$$A_i = a \{u_i(X^o) - v_i\} + b \frac{du_i(X^o)}{dt} + cg$$

ρ_f : 粒子密度 ρ_p : 流体密度

この三つの式を用いて気泡粒子と流体が相互に与える影響を計算する。

2.2 流速の計算方法

流速は各格子単位で計算可能な GS 成分と孔子以下の小さな乱れである SGS 成分からなる。GS 成分については NS 方程式を用いて計算するが、SGS 成分は直接計算できないためモデル化して考える。

以下にその式を示す。

$$\tau_{ij} = -v_e S_{ij} + \frac{2}{3} q_{sgs} \delta_{ij}$$

v_e : 渦粘性係数 S : 歪み速度テンソル

q : 乱れエネルギー

モデル化された SGS 成分と第三式によって計算された粒子の力の式を第一式に組み込むことで流速を求める事ができる。

3. 計算条件

計算領域は沿岸部近傍、海底面から水面に至るまでの全域三次元とする。波はクノイド波と仮定している。海底面勾配、粒子数、周期、粒子密度は設定可能。本研究では気泡粒子を議論している為粒子密度は 0 としている。相互に影響を受

けて更新された流速、乱れエネルギー、粒子の受ける力は保存され、次のタイムステップでの計算に使われる。

4. 結果

計算結果から出せるものは以下の通り

- ・ 流速の分布
- ・ 粒子の分布
- ・ 渦度の分布

今回は渦度分布

5. 結論

今回の結果は渦度分布に留まったが、計算条件を様々に変えて比較することで気泡粒子と流体が相互に与える影響の大きさやその推移を議論する事が可能となる。

研究内容についての詳細は発表当日明らかにするものとする。

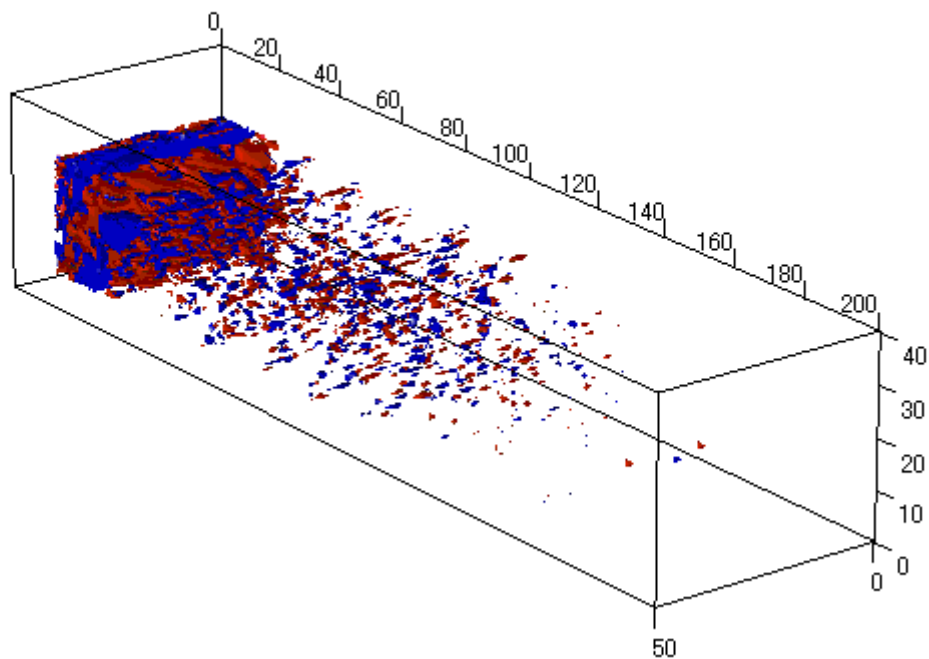


図-2 気泡粒子により誘発された渦度