

II - 39

砕波後の3次元大規模渦と乱れ特性

北海道大学 ○学生員 安原 幹雄
 北海道大学大学院 正員 渡部 靖憲
 北海道大学大学院 正員 佐伯 浩

1. はじめに

砕波後に生成される渦は海底砂の浮遊及び漂砂問題に大きく関わる。この時、顕著に表れる水平ローラー渦に加えて斜行渦の存在が、混入気泡の観察により確かめられてきた (Nadaoka et al)。水平ローラー渦は、ジェットの着水後、ボア領域に渡って特に surfacelayer を中心に進行するが斜行渦波海底に向かう方向の軸を持ち発達するため特に底質の浮遊に寄与すると考えられてきた。

しかし、この3次元渦構造の生成、発達機構が未解決なため、浮遊さに対する力学的関係は明らかではない。Nadaoka et al(1986) は、斜行渦が平均変形速度テンソルの deviation part の方向と類似していることを指摘した。気泡の観察により砕波後の渦構造を斜行渦を含めて分類した。しかしながら、様々な波浪地形条件で限定された形態をとるのか、また実海域に適用する場合、どのように対応させるのか疑問である。形態分類は観察者の主観にも依存し複雑な渦の生成過程において、どれ程有効かも疑問である。

本研究は、3次元 Large Eddy Simulation により2次元流体運動から3次元への遷移、粒子追跡による斜行渦生成の検証、3次元渦特性の調査を通して斜行渦の生成、発達機構を解明しようとするものである。

また、底質における圧力、せん断力特性を調べ海底砂浮遊に関する外力について議論する。

2. 数値計算法

本研究では、砕波体内の3次元的大渦の時空間特性を把握することを目的とし、渡部ら(1998)と同様の数値計算法により計算を行った。本計算においては、乱流 model のなかでも比較的剥離や大規模渦を拡散せずに表現できる LES を採用した。LES では GS (grid scale) と SGS (sub grid scale) とに成分分離し SGS 成分のモデル化をする。

LES ではガウシアンフィルター $G(x, x')$ を採用している。

$$G(x, x') = (6/\pi\Delta)^{1/2} \exp\left[-6(x-x')^2/\Delta^2\right]$$

ガウシアンフィルターにより、Large Scale 量を次のようにフィルター操作する。

$$\overline{f(x)} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x') G(x, x') dx'$$

フィルター操作により、Navier-Stokes 式は次のように書き換えられる。

$$\frac{D\overline{u}}{Dt} = -\nabla\overline{p} - \nabla \cdot \overline{\tau} + \frac{1}{Re} \nabla^2 \overline{u} + g$$

となり、SGS 応力は

$$\overline{\tau} = \overline{u \otimes u} - \overline{u} \otimes \overline{u}$$

と書ける。

また渡部らと同様に本計算ではSGSモデルを採用した。以下SGSモデルを概説する。

$$\nu = \nu_0 \left[1 + H \left(\frac{c_s^2 \Delta^4 \nu}{\nu_0^3} (2S:S) - C \right) \right]^{1/3}$$

H はヘビサイド関数であり、 $H(x)=x$ ($x>0$)、 $H(x)=0$ (それ以外) と定義される。 S は歪みテンソル ($=\nabla\mathbf{u}+\nabla\mathbf{u}^T$) であり、 $C=75$ 、 $c_s=0.0062$ 、 ν_0 は分子粘性、フィルタースケール $\Delta=(\Delta x\Delta y\Delta z)^{1/3}$ である。

$\frac{c_s^2 \Delta^4 \nu}{\nu_0^3} (2S:S) \gg C$ の時、良く知られたスマゴリンスキーの渦粘性モデルとなる。

$$\nu_e = c_s \Delta^2 (2S:S)^{1/2} \quad \nu = \nu_e \quad (\nu_e \rightarrow +\infty \text{ のとき})$$

一方、GS成分量に関して、渡部ら(1996)と同様に分離解法により非移流・移流差分方程式をそれぞれCrank-Nicolson法及びCIP法で解くことができる。

$$\text{Non Advection Phase: } \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} = -\nabla \bar{p} + \mathbf{g}, \quad \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} = \nu \nabla^2 \bar{\mathbf{u}}$$

移流項は次に示すようにCIP法によって評価する。

$$\text{Advection Phase: } \frac{D\bar{\mathbf{u}}}{Dt} = 0$$

3次元CIP法では、エミュレートスプライン関数により、計算セル内の物理量 f 及びその微分値を、 $-\Delta t$ のタイムステップから各物理量及びその微分値が移流されるとして評価する。

また自由表面を識別するために密度関数法を採用し、入射境界では2次クノイド波が造波される。

境界条件に関しては、底面、側壁ともにnon-slip条件を与えた。

以下に波浪条件、計算条件を示す。

	waveheight/ depth	bottomslope/ breaking type	Reynolds number	timestep/- grid interval	B.C for bottom and side wall	B.C for component on Free surface	T
CAS- E1	0.45 0.25	1/20 spilling	389830	1024 0.04	non-slip	non-normal gradient	1.2
CAS- E2	0.45 0.25	1/20 plunging	389 830	1024 0.04	non-slip	non-normal gradient	2
CAS- E3	0.45 0.25	1/10 plunging	389830	1024 0.04	non-slip	non-normal gradient	2

3. 結果と考察

3. 1 砕波後の渦構造

著者ら(1998)の過去の研究により、ジェットに着水直後に3次元的な渦が生成され複雑な渦干渉を経て発達することが明らかになっている。この節では波浪条件の差異による渦構造特性を調べていく。

図1は、CASE1のボア状フロントとなって進行する段階における等渦度面を表している。白色は無次元渦度+2、黒色は-2の値を示す。(a)はm軸を軸とした渦度成分 $\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial x}$ 、(b)は1軸を軸とした渦度成分 $\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y}$ 、(c)はn軸を軸とした渦度成分 $\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}$ を表している。(a)、(b)、(c)をそれぞれ水平渦、旋回渦、縦渦と呼ぶことにする。2度の着水により生成された2つの大規模水平渦を中心に進行している。旋回渦は最初の着水で生成され、1軸方向に細長く正負の渦度が交互にm軸方向に配列する組織構造もっている。この位相において、この旋回渦はさらに伸長され規模も発達している。縦渦は側壁の境界

層を巻き込んで発達するため渦干渉も大きいと考えられ、比較的小規模な渦も存在している。この位相は遷移領域が終わった直後であり、まだ十分組織渦構造をもつが、徐々に小規模渦に分解されている段階といえる。この段階の同様な渦度分布は他の同様な砕波形態で波浪諸元が異なるものと定性的に非常に類似しており、典型的な巻き波砕波の渦発達過程の特徴と見なしてよい。

図2は、砕波後ボア領域前の位相を表している。plunging breakerとは大きく異なり波頂及び波のフロント前面でのみ $\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial x}$ 成分の渦が存在している。 $\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial y}$ 成分は鉛直流速に、 $\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}$ 成分は水平流速によって発達した波動境界近傍でのみ渦が発生しているのがわかる。

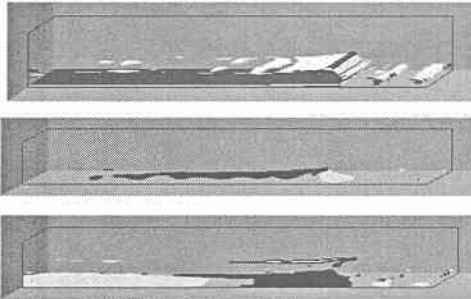


図 1 等渦度面 (CASE1)

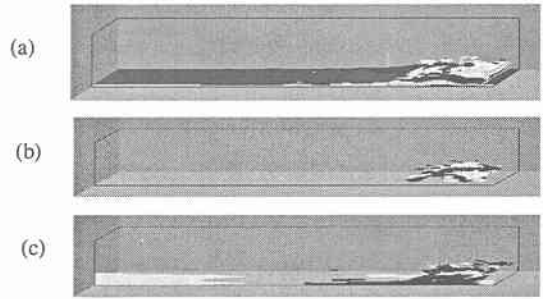


図 2 等渦度面 (CASE2)

3. 2 底面剪断応力分布

この節では海底砂の巻き上げ、輸送拡散作用の外力となる海底面における剪断力の各成分の特性を調べていく。一般に海浜における砕波後の地形は3次的に変形するが、砕波形態に依存するその分布特性を議論していく。図3はCASE 1 (spilling breaker)における底面剪断力成分 $(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y})$, $(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x})$, $(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})$ の分布を表している。この位相は図1に対応している。これらの図からもspilling breakerの場合2次的な $(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})$ 成分は明確に現れるが、他の2成分は顕著に現れない。漂砂実験等で形成される地形はspilling breakerの場合plunging breakerと比べ大きな変化を伴わず、岸沖方向のRipple地形を形成することが多く、この結果を裏付けているといえる。

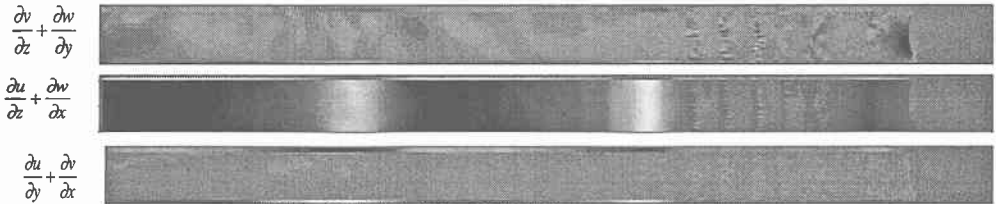


図3 剪断応力分布 (CASE1)

図4 CASE 2 (plunging breaker)に対する同様な分布を示したものである。この位相で顕著になる特性は、砕波フロント直下において水槽中央部付近に円形に分布する剪断力である。これらは2度の着水によって生成された大規模渦が複雑に絡み合い、底面に達したものと考えられ、大規模な地形変化が予想される。この時、生成された渦と斜行渦の関係を議論するためにはさらに詳細な調査が必要である。

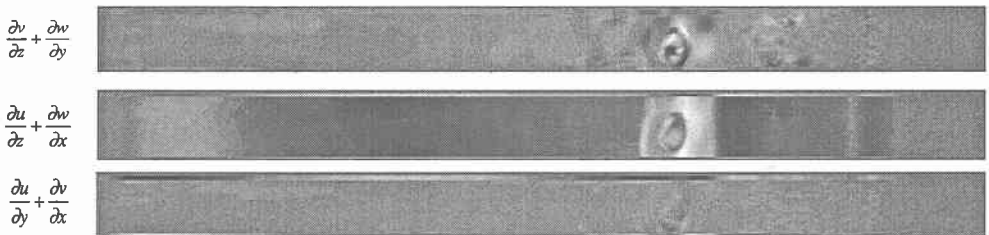


図4 剪断応力分布 (CASE2)

図3はCASE3 (large scale plunging breaker) の同様な分布である。このCASEは plunging point 以前に乱流底面境界層を伴う急激に発達した砕波である。全ての成分において非常に複雑な剪断力分布をもつことがわかる。特に $\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}$ 成分, $\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}$ 成分, は岸沖方向に筋状に広がり正負の値が複雑に分布する。また $\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$ 成分は砕波フロント部の側壁近傍に非常に強い応力が集中している。これらの3次的応力により打ち上げられた水面が傾斜させられていることも興味深い結果である。

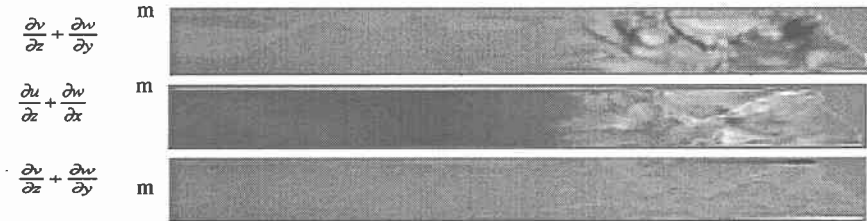


図5 剪断応力分布 (CASE3)

3. 3水粒子移動特性

3次元的大規模組織的渦で最も顕著な性質を示すものが斜行渦ということができる。前述したように現在まで気泡の観察でのみ確認されてきたが、その発生原因は未解決である。混入気泡の浮力もまた渦運動に大きな影響を与えている可能性もある。3次元渦構造は、3. 1で示したようにそれぞれの方向の渦成分の組み合わせから形成され、その結果波の進行方向に対して斜め後方に軸を持つ斜行渦が形成されている可能性もある。しかしながらその見極めは困難であり、気泡トレーサーのようにLagrange的に水粒子を追跡し、この渦を特定する必要がある。先ず、基本的な水粒子軌道を調べるため着水点近傍の全計算メッシュにマーカーを配置しその移動を追跡した。全てマーカーは、次の定義に従って移動させられる。

$$\frac{DX(l, m, n)}{Dt} = 0$$

図 (a), (c), (d), (e) は、CASE2 におけるそれぞれ特徴的な移動形態をとる位相のマーカー座標をプロットしたものである。(a)は初期のマーカーの配置図である。(b)においてジェットが着水し、ジェットのマーカーが前方の波谷で直接跳ね返ってスプラッシュアップしているのがわかる。(c) ~ (d)にかけて着水後、波谷の流体を貫通した反動で、前方の流体が追し出され、(b)で跳ね上がったジェットを追って前方に飛び出しているのがわかる。(e)では砕波フロントの通過により完全にマーカーが拡散した状態を表している。この図から直接3次元軌道を知ることにはできないが、大まかな空間移動特性が明らかになった。さらにこの結果は浮遊砂の輸送機構及び大規模な拡散特性を知る手がかりにもなる。さらに今後詳細な検討を行う必要がある。

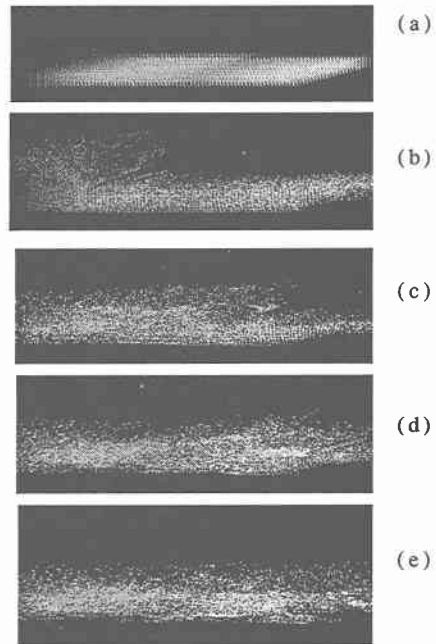


図6 マーカー粒子移動軌跡

4. 結論

3次元LESにより砕波形態による3次元渦構造の違いを明らかにした。剪断力分布も砕波形態に強く依存し大規模な砕波ほど3次元性は強化される。砕波の拡散作用について可視化した。