

波群に及ぼす強風の影響

名古屋工業大学大学院 学生会員 ○加藤寛之
名古屋工業大学大学院 フェロー 喜岡 渉

1. はじめに

強風域を離脱して、比較的長距離を伝播してきた波群性のうねりが再び強風の影響を受けるとき、伝播方向に吹く風により波群個々波は減衰するのかどうかを含めて、強風が波群特性に及ぼす影響については不明のままである。最近になって、波面上の気流乱流特性を直接、数値解析によって調べようとする研究が活発に行われており、風波の発達・減衰機構が気流の乱流特性から明らかにされつつある。Sullivanら(2000)および木原ら(2005a, b)は一定速度で進む一様波列上の気流を3次元直接数値解析(DNS)により調べ、気流が乱流の場合でも臨界高さが平均風速分布や圧力分布に影響を与えることを示すとともに、風波の位相速度 c と気流の界面摩擦速度 u^* で定義される波齢 c/u^* により臨界高さ付近の気流の乱流構造が大きく変化することを示している。なお Cohen・Belcher(1999)は、境界層モデルを用いて、うねりのような c/u^* がほぼ 25 以上となる高波齢 (fast wave) では非剥離シエルタリング機構により波浪は減衰するが、その有意な減衰に要する時間は1日以上と長くなることを理論的に示している。

本研究では、強風域を伝播する fast wave であるうねりに及ぼす気流の影響を明らかにすることを目的として、波齢 15~25 の波面上の気流乱流特性を3次元の LES による数値解析により調べようとするものである。波群性の波浪については、個々波の波高の異なり、すなわち波形勾配 ak の変化の臨界高さシエルタリング機構への影響も明らかにしておく必要がある。

2. 計算方法

本計算で対象とした計算領域を図-1に示す。計算は主流方向 H_x に2波長、スパン方向 H_y に1波長、鉛直方向 H_z に1.5波長の領域で計算を行った。底面にはストークス波第2次近似解によるスパン方向に一樣な2次元進行波形の流体壁を設置し、境界条件に進行波の主流方向と鉛直方向に対応する水粒子流速成分を与えた。また、上面には摩擦が生じない free-slip 境界条件を、主流方向、スパン方向には周期境界条件をそれぞれ適用した。進行波と同じ速度で進む移動座標系 $x = x' - ct$ を用いることで底面の波形を時間的に変化させない。デカルト座標系を用い、主流方向、スパン方向の格子間隔は等間隔に、鉛直方向は波面で密になるような不等間隔格子を配置した。

波浪場の風の影響をシミュレーションするにあたり乱流モデルに LES(梶島, 1999)を用いた。支配方程式は

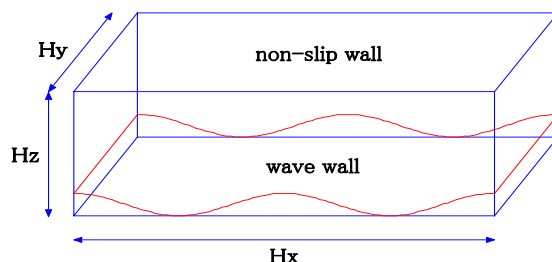


図-1 計算領域

grid scale による平均を行い sub grid scale に対して Smagorinsky モデルで近似した非圧縮性流体の NS 方程式と連続式を用いた。

乱流場の計算方法は、SMAC 法を利用して時間発展させた。計算格子には staggered 格子を用い、NS 方程式の時間微分は、3次精度の Adamas-Bashforth 法を用いた。また空間微分は移流項に2次精度中心差分、圧力項に1次精度中心差分、粘性項に2次精度中心差分をそれぞれ用いた。

流れ場の各格子上において連続式を満たすように、圧力に関するポアソン方程式を解いて補正を行った。その際、主流方向とスパン方向には等間隔のデカルト座標に周期境界条件を用いているので、主流方向、スパン方向には FFT を用いて波数空間で計算を行った。これにより、鉛直方向に対して3重対角行列による連立方程式を解くことで SMAC 法によるスカラーポテンシャルを求めることができる。

計算時に気流のエネルギー供給が行われない場合、気流の粘性により流速が徐々に弱まってしまいう問題が起こる。そこで、気流は主流方向の圧力勾配により駆動するとし、気流が安定するよう主流方向に一樣な圧力勾配を加え、統計的に定常状態となる完全発達乱流を検討対象とした。

また、実際に計算を行う前に計算精度を検証するために、例えば木原ら(2005b)と同一条件で計算を行い、平均流速や粘性応力などの分布がほぼ一致することを確認した。

3. 計算結果

波面上の気流は、主流方向に界面の波形と同じ波数の変化をする平均流が生じる。今回の解析では、物理量 $q(x, y, z, t)$ から位相平均量 $\bar{q}(x, z)$ を算出し、さらにアンサンブル平均 $\langle q \rangle(z)$ と波状成分 $q_w(x, z)$ に分け考察を行った。

次に、解析を行ったケースの計算条件を表-1に示す。case 1~8 は単一波で case 9, 10 は2成分合成波である。

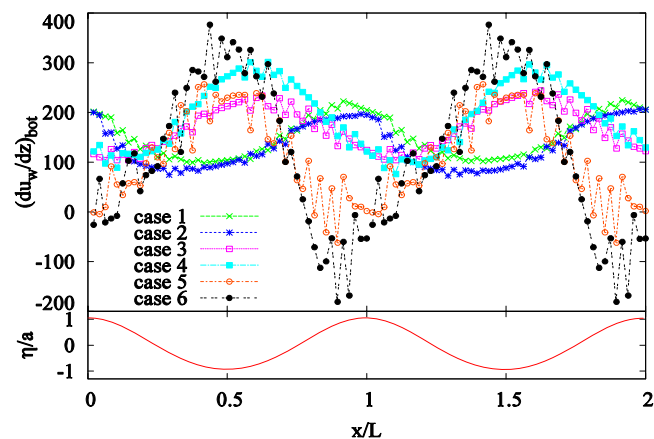


図-2 単一波のせん断応力分布

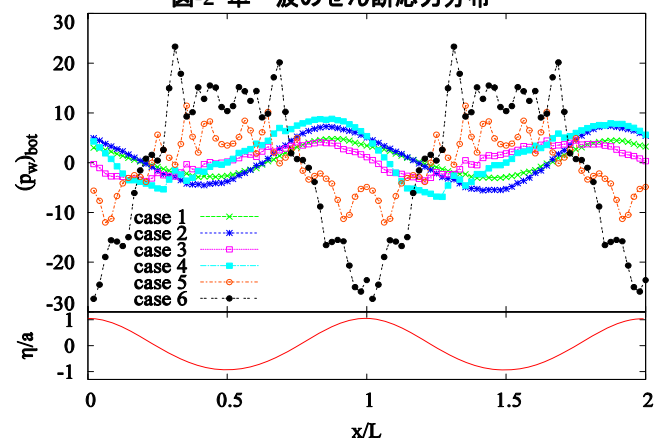


図-3 単一波の圧力分布

表-1 計算条件

Case	ak	c/u*	Re _τ
1	0.10	4.0	150
2	0.20	4.0	150
3	0.10	8.0	150
4	0.20	8.0	150
5	0.10	16.0	150
6	0.20	16.0	150
7	0.10	24.0	150
8	0.20	24.0	150
9	0.05	8.0	150
10	0.15	16.0	150

図-2,3 は単一波におけるせん断応力と圧力の分布を示している。風波の発達に影響する $c/u^* = 4.0$ の場合では、せん断応力・圧力ともに波の峰で最大となっている。akが増加すると、せん断応力・圧力それぞれのピーク値は大きくなるものの波齢が大きいために比べると変化量は少ない。一方、うねりの影響に関わる $c/u^* = 16.0$ では、粘性応力・圧力ともに波の谷で最大となっている。また、akの値が増加するとせん断応力・圧力ともに比例して大きくなっている。

図-4,5 は2成分合成波におけるせん断応力と圧力の分布である。 $c/u^* = 8.0$ では、せん断応力は単一波の場合とほぼ同位相で同じピーク値となっている。圧力分布もほぼ同位相で変化しているが、単一波の分布より変化量が少ない。 $c/u^* = 16.0$ では、せん断応力・圧力とも

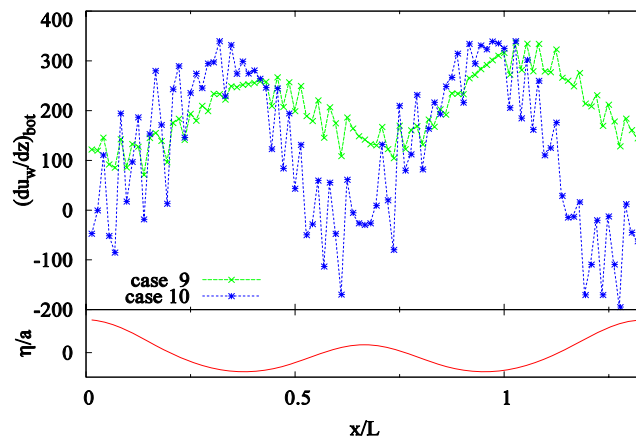


図-4 2成分合成波のせん断応力分布

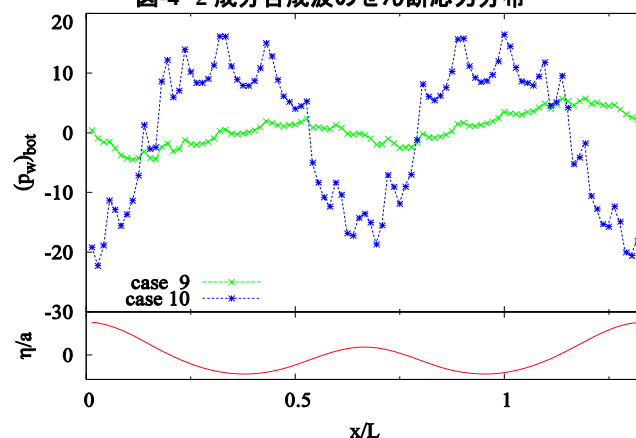


図-5 2成分合成波の圧力分布

に単一波の場合とほぼ同位相の変化をしている。しかし、せん断応力の値は η が小さいときにおいても η の最大値に対応する case 6 とほぼ値で変化をしている。一方、圧力分布のピーク値は case 5 と case 6 の中間の値となっている。

4. おわりに

以上の結果より、うねりがふたたび強風域に侵入した場合、波に加わる応力分布は風波の場合とはまったく異なることがわかった。また、2成分合成波の気流の影響は、せん断応力分布は最大波高に対応した単一波と、圧力分布は平均波高に対応した単一波とほぼ同様な値をとることがわかる。また、計算条件にレイノルズ数を小さく設定したため、高レイノルズ数の場合においてさらに検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 木原直人・花崎秀史・植田洋匡(2005a): 大気・海洋間での物質交換過程に風波が及ぼす影響に関する数値的研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.61-65.
- 木原直人・花崎秀史・植田洋匡・水矢亨(2005b): 進行する風波上の流れにおける乱流構造, 日本機械学会論文集(B編), 第71巻, pp.86-93.
- 梶島岳夫(1999): 乱流の数値シミュレーション, 養賢堂.
- P.P.Sullivan, J.C.McWilliams and C.Moeng (2000): Simulation of turbulent flow over idealized water waves, J. Fluid Mech., vol. 404, pp.47-85.
- J.E.Cohen and S.E.Belcher (1999): Turbulent shear flow over fast-moving waves, J. Fluid Mech., vol.386, pp.345-371.