

## 造波機の波が風波下の平均流と乱流構造に与える効果について

広島工業大学 正会員 ○水 野 信二郎  
 広島工業大学大学院 原 田 真 仁

### 1. 研究の目的

一定風速の下で、造波機で発生した波は水面上の風速分布、風波、および水面下の流速分布に影響を与える。従来、風速分布と風波に与える効果については多くの研究があるが、水面下の流れの平均流速と乱流変動に関する研究は少ない。そこで、風洞水槽における風波下の乱流場に造波機による波を加え、水面下の乱流構造が如何に応答するかを詳しく調べ、その実験結果を前回発表した。造波機による長波は、風速分布と水面下の平均流速分布に対し同じ様な効果を持つと考えられてきたが、以下に示すように風洞水槽では大きく異なる事が明白となった。本発表ではその理由と物理機構について考える。

### 2. 実験結果の要旨

(1) 造波機による波を加える時、水面上の風速分布は対数分布で近似でき、その勾配が僅かに変化するだけである (Cheng & Mitsuyasu, 1992)。

(2) 水面下の流速は風だけのケースでは水面付近では風向きに、水底付近では風と逆向きに流れる1次循環流を形成する事はよく知られている。併し、鉛直断面を計測すると、図1の(A1)に示す様に側壁付近で風向きの流れが強く、逆流は中央付近のみで観測されて、流れは横方向に一樣ではなくて2次循環流の影響が強い。

造波機による波を加えると、水面下の流速分布は波を風と同じ向きと逆向きに加えたケースで全く逆効果が起きる事を見出した(A2)と(B2)。

即ち、ケース(B2)では、流速が弱く水面付近を除き、平均流速の流れは風と逆向きに向かった。直観的には風向きに波を与えるので、風向きに流れが加速されそうだが、その様にはならない。その理由は、風に直交する断面内で水面下に強い2次循環流が発生するため上下層の流れが混合し、全体としての流れを弱めるためである。他方、ケース(A2)では、直観とは逆に水面付近の流速は風向きに増加し、

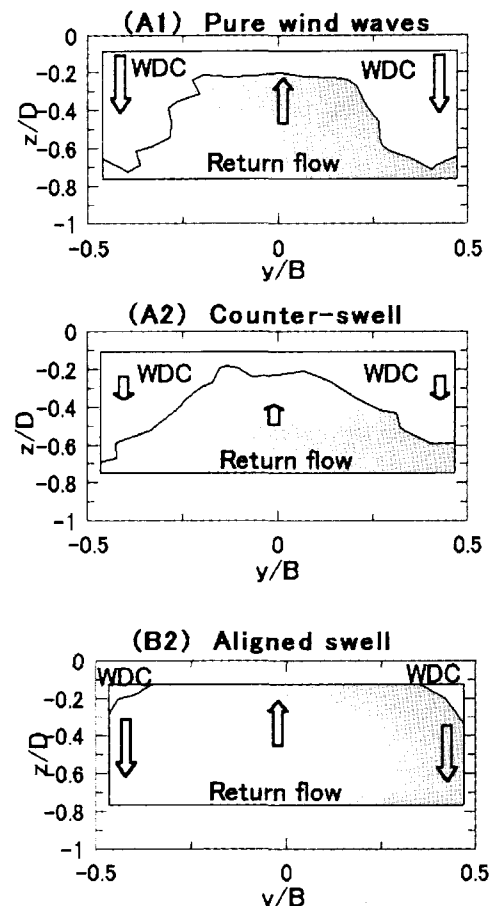


図1 3ケースの平均流速 ( $U$ ,  $W$ ) の鉛直断面分布の比較。横軸  $y/B$  は無次元横座標。全ケースで、流速  $W$  は水路中央で上昇し、側壁で下降する鉛直循環流を形成しているが、ケース (B2) で鉛直循環流の強さは最大である。 $U$  は風向きの流れ ( $U > 0$ ) を白、逆流を灰色で示す。風と同じ向きに波を与えたケース (B2) では、弱い逆流が測定断面の大部分で観測された。

1次循環流を強める様に作用した。結論として、造波機による波の効果は水面下の流速分布に、直観的には理解し難い効果を与える事が分かった。即ち、風と同じ向きに波を加えると一次循環流を減速し、風と逆向きに波を加えると一次循環流を加速する。

### 3. 実験結果の議論

つぎに上の実験結果を力学的に説明する。

通常、造波機の波と平均流の間の相互作用は、波によって誘起される Reynolds 応力と流速シアの積、即ち、

$$-\overline{uw}\partial U/\partial z$$

によって説明される。ここで、 $u, w$  は造波機による波の水平・鉛直流速成分、 $U$  は平均流速、 $z$  は鉛直座標である。波の Reynolds 応力  $-\overline{uw}$  は風が無い場合ゼロであるが、風波が存在するとゼロではない。

特に、風と波が同じ向きのケース (B2) では  $-\overline{uw} < 0$  となり、このエネルギーは波から流れに向かう事が知られている (Cheung & Street, 1988)。併し、このエネルギーの流れは先に述べた実験結果とは逆向きで、流れが減速する実験事実を説明できない。

そこで、我々は水面下の 2 次循環流の強さが 1 次循環流に影響を与えていると仮定して議論を進める。波の Stokes ドリフトを考える。Stokes ドリフトは次の 2 つの性質を持つ。

(1) 質量輸送速度をもつ。風と波が同じ向きのケースでは造波機の波はフェッチの増加と共に発達する。従って、水槽の末端で波の波形勾配が大きくなるので反射が起こり、その効果は無視できない。即ち、水槽の末端で Stokes 波の質量輸送速度の反射が起こり、風と同じ向きに波を加えると、(B2) に示す様に平均流速が風と逆向きに増加するのは波の質量輸送速度が反射する事によって説明できる。波が風に逆向する場合、造波機の波は減衰するので、波の質量輸送速度も水槽の末端で微弱となる。従って、このケース (A2) では波の質量輸送速度の反射は無視できる。

(2) Craik-Leibovich (1976) の Langmuir 循環流に関する CL 機構、即ち、波と平均流の間の相互作用を考える。CL 機構では波の Stokes ドリフトと流れのシアの非線型相互作用により、流れの  $y, z$  成分に次の加速度項が加わり、

$$A_y = U_s \frac{\partial U}{\partial y}, \quad A_z = U_s \frac{\partial U}{\partial z}$$

風向きの渦度成分の増幅に寄与する。ここで、 $U_s$  は波の Stokes ドリフトの  $x$  成分 (風向きを正とする)

である。この式から明らかな様に、同じ流れに対して、 $U_s$  の正負により CL 機構は加速度の向きを逆転させる。従って、波向きが風向と同じケース (B2) と逆のケース (A2) で波が流れに及ぼす効果は逆転し、上に示した実験結果の特徴をうまく説明できる。具体的にはケース (A2) では Stokes ドリフトの作用は風向きの渦度成分、即ち、鉛直断面内の 2 次循環流を弱め、ケース (B2) ではそれを強めるように作用する。この理論の予測は 2 次循環流の強さに関する実験結果と一致している。

今まで CL 機構は理論や数値計算では 2 次循環流の形成機構として有力な学説として評価されてきた。しかし、肝心の実験結果又は観測結果が存在しないため疑問視されてきた。上の風洞水槽実験は CL 理論を支持する実験結果である。

(3) 次に 2 次循環流が 1 次循環流に及ぼす効果について考える。

2 次循環流が強まると、上層の風向きの流れと下層の風に逆行する流れが上下混合するので、ケース (B2) では 1 次循環流を弱める様に作用し、全体としての流れのスピードが低下するケース (B2) の実験結果を説明できる。下層で逆流が目立つのは、

(1) で述べた様に波の Stokes ドリフト (質量輸送速度) の反射効果を考えれば説明できよう。

逆に、2 次循環流が弱まったケース (A2) では、風の摩擦応力を一定とすると、風の応力は鉛直流速成分を加速する代わりに水面付近の水平流速成分を加速する様に作用するため、鉛直シアを増加させ強い 1 次循環流が生成される。

このように、2 次循環流が強いケースでは 1 次循環流は減速し、2 次循環流が弱いケースでは 1 次循環流は加速される。従って、実験結果は 2 次循環流の強弱により説明できる、と結論する。

波が平均流に及ぼす効果を説明してきた。波が流れの乱流構造に与える効果は次に譲る。