

## 風洞水槽における水面下の乱流構造について

広島工業大学工学部 正会員 O 水野 信二郎

広島工業大学大学院 学生会員 徳市 匡圭

## 1. はじめに

風洞水槽の風波下の流れの流速分布と乱流構造の研究は平板上の乱流境界層との相似性と差異を比較する形で研究が推進されている。平板境界層との共通性が見られる実験結果もあるが、平板上の乱流境界層とは異なる多くの現象が出現している。何故相違が起こるかの説明が重要であるが、未解決な問題として積み残されている。特に、風と同じ向きに造波機で発生させた長波（周期1 Hzの波）を加えると、平板上の乱流境界層に比べ乱流のエネルギー・レベルが格段に増す。長波が流れに如何に作用して乱流エネルギーのレベルが増加するのか、説明できず未解決である。本小論では、初めに従来の風波下の流れの流速分布と乱流構造の成果を整理する。

(1) 水面直下の乱流変動の強度の鉛直分布は平板乱流境界層上のものとほぼ等しい変化を示す (Cheung & Street, 1988)。併し、風と同じ向きに造波機で発生させた長波を加えると、乱流強度のエネルギー・レベルが格段に高くなる。高いエネルギー・レベルは主に、風波のピーク周波数よりもかなり低周波数域で起こる。

(Cheung & Street, 1988; Thais and Magnaudet, 1996)

(2) 平均流速分布は低風速では平板境界層とほぼ等しい対数流速分布を示す。併し、高風速になると対数則は維持されるものの、流速勾配が平板境界層のものに比べ目立って弱くなる (Cheung & Street, 1988)。この理由は不明である。

(3) 造波機で風と同じ向きに長波を加えると、低風速でも平均流速が平板境界層の場合に比べ著しく減少する (Cheung & Street, 1988)。この理由も不明である。

(4) 風洞水槽における流速のパワー・スペクトル分布の主な特徴は、風波のピーク周波数よりもかなり低周波数に高いエネルギー・レベルが存在する (Yoshikawa *et al.*, 1988)。その説明は不十分である。

(5) 造波機で発生する長波は単純な正弦波と考えると、その Reynolds 応力  $-\overline{u'w'}$  は線形波理論によりゼロとなる筈であるが、風波下で実測すると非常に大きい正又は負の値を取る。その理由は分かっていない (Cheung & Street, 1988; Thais and Magnaudet, 1996)。  $-\overline{u'w'} \neq 0$  の実測結果は海上タワーでも観測されていて、風波が発達過程にあれば正、風が弱くうねりのみ存在する場合にはゼロとなる観測結果が得られている。(Cavaleri and Zecchetto, 1987) 問題は、  $-\overline{u'w'} > 0$  のとき波が流れの鉛直シアに作用して流れや乱流の生成に役立つと考えて、つまり、乱流 Reynolds 応力による乱流生成と同じ様な機構が波の Reynolds 応力の場合にも作用すると考えて議論されている。波と流れは本当に力学的相互作用を行うか否か、研究者の間で論争が続いている。

この様に水面下の乱流運動の実験結果は、単純に見えて実は良く分かっていない。これらの原因となる物理機構を解明するために、我々は新しい新しい乱流モデルを提案する予定である。

まず、(5)の問題に対して、波は風波下で確かに  $-\overline{u'w'} \neq 0$  となるが、  $-\overline{u'w'} > 0$  となっても流れや乱流の生成機構とは無関係であり、波がフェッチと共に発達していると  $-\overline{u'w'} > 0$  となるに過ぎない、と云う結論を我々は導く。そこで、波形を

$$\tilde{\eta} = a \exp(\mu x) \cos(kx - \omega t). \quad (1)$$

とおく。(1)式は  $\mu = 0$  のとき、ポテンシャル流の解であるが、  $\mu > 0$  の場合  $x$  方向に指数的に発達する正弦波

を表す。  $\tilde{w} = \frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial t}$  とし、簡単の為水深を無限大と仮定すると、  $\tilde{w}$  は深さと共に指数的に減衰するから

$$\tilde{w} = \omega a \exp(\mu x + kz) \sin(kx - \omega t) \quad (2)$$

となる。(2)を連続の式に代入すると、

$$\tilde{u} = \frac{\omega a k}{k^2 + \mu^2} \exp(\mu x + k z) \{k \cos(kx - \omega t) - \mu \sin(kx - \omega t)\} \quad (3)$$

を得る。従って、波の Reynolds 応力は

$$-\overline{\tilde{u}\tilde{w}} = \frac{\mu k}{2(k^2 + \mu^2)} (\omega a)^2 \exp 2(\mu x + k z), \quad (4)$$

で与えられる。ここに、上線は時間平均値である。(4)式から、波の Reynolds 応力は  $\mu > 0$  又は  $\mu < 0$  に従って、正または負となる。海上タワーで観測された多くの正確な測定データから、Cavaleri and Zecchetto (1987)は風波が発達過程にある  $\mu > 0$  の場合は  $-\overline{\tilde{u}\tilde{w}} > 0$ 、うねりのみ存在する  $\mu = 0$  の場合は  $-\overline{\tilde{u}\tilde{w}} = 0$  と云う観測結果を得た。(4)式は彼等の観測結果と良く合う。言い換えると、波が発達過程にある場合には見かけ上、 $-\overline{\tilde{u}\tilde{w}} > 0$  となり、正の Reynolds 応力が存在するよう見えるが、水面下で Reynolds 応力を通して平均流との間に運動量の交換が起こる事とは無関係である。これが(5)の問題に対する我々の答えである。

さて、長波を風波の場に加えた実験において、流速変動は時間平均値、波と位相が合う流速成分、波と無相関な乱流成分の3成分に分けて計算される。更に、波と位相が合う流速成分は線形理論に従う potential 項と、 $-\overline{\tilde{u}\tilde{w}} \neq 0$  の部分からなる Rotational 項に分解され、Rotational 項は波と平均流や乱流成分と相互作用を考えると詳しい議論が行われている。併し問題(5)の結論から、波の軌道粒子速度と平均流の間に力学的相互作用を考える必要は無く、波の軌道粒子速度は流速の乱流変動ではなく単にノイズである、と我々は結論する。

#### 実験と実験結果

実験は長さ  $L_w = 13\text{m}$  の風洞水槽、風速  $U_w = 7\text{m/s}$  で、風波のみを発生する Pure wind wave の実験と、水槽の風下端で風に逆行する周期1秒、波高5cmのうねり(長波)を加えた Counter-swell の実験からなる。フェッチ5.5mの位置の鉛直断面内で2成分レーザードップラー流速計で流速2成分(水平x-成分u; 鉛直z-成分w)の断面分布を夫々計測した。計測断面は幅  $B = 29\text{cm}$ 、水深  $D = 25\text{cm}$ 、風の吹く断面の高さ  $h = 30\text{cm}$  の小型風洞水槽である。計測点は組織的で、横方向(y)に2cm間隔で15点、鉛直方向に2cm間隔で9点( $-20\text{cm} \leq z \leq -3\text{cm}$ )、1点の計測時間250秒、合計135点を風速7m/sの下で連続して凡そ10時間かけて計測した。

計測の目的は風だけのケースと周期1秒のうねりを加えたケースで水面下に2次元的で、組織的な乱流構造に似かなる変化が現れるかを調べることである。下図に水面下3cmの深度の平均流速(U, W)の水平分布を示す。記号は実験値、線はデータの近似二次曲線である。風波のみ(Pure wind wave)のケースでは、両側壁に2cm/s程度の有意な下降流Wが存在する。風と逆向きに周期1秒の正弦波を加えると、鉛直流速成分Wが著しく減少すると共に、風向きの水平流速成分Uが増加し、吹送流を著しく増加させる効果がはっきり認められる。

