A103

水面に作用する気流のせん断応力に関する研究

水谷 夏樹(大阪産業大学), キム ビョンイル[○](大阪産業大学大学院)

Wind Shear Stress Acting on Water Surface

Natsuki MIZUTANI and Byungill KIM

ABSTRACT

This study investigated about the continuity of momentum flux through an air-water interface. We conducted to measure air-flow and water-flow very close to a water surface in a wind wave tank using PIV technique. To evaluate of the continuity of momentum flux calculating from the friction velocity was very difficult, because we could not detect exact a mean water level to fit a log-law profile for the experimental data. The viscous stress affected not only the viscous sub layer but also the turbulent boundary layer. The ratio of the viscous stress in water-flow is from several percent to about ten percent. We deduced that the continuity of momentum flux calculating from the total stress was strongly affected by three-dimensional turbulent water-flow.

Keywords: wind shear stress, momentum flux, Reynolds stress, viscous stress

1. 緒 言

水面に作用するせん断応力は、風側から評価されたものと水側から評価されたものが一致しないという問題がある。海面上で評価された風のせん断応力が波と流れと乱れに対してどのような寄与率で配分されているのかについては不明なままであり、波浪推算と吹送流の発達モデルなどにおいては、海面のせん断応力に統一したパラメータが用いられていないのが現状である。光易・草場¹⁾は、風のせん断応力のうち、水面下の吹送流に伝わるせん断応力が55%であることを示しており、45%の差異については水平運動量の空間勾配が原因である可能性を述べている。また、彼らは界面活性剤を用いて波の発達を抑制した実験を行い、波の発達はせん断応力の連続性に対して本質的ではないことを示している。

以上のような既往の研究を踏まえ、水面を挟んだせん断応力の連続性の解明には水面ごく近傍にある微細な乱流構造を知る必要があると考え、本研究では水面を挟んだ気流と水流の微小領域における可視化計測を行い、波が立ち始める弱風条件下において、せん断応力の連続性について検討を行った。

2. 可視化実験の概要

実験は、大阪産業大学が所有する全長6.0m×幅0.2m×高さ0.9mの全面アクリル製の風洞付き水槽を用いた。水深は0.45m、気流部の高さは0.25m、計測点の吹送距離を3.5mとした。

気流と水流の計測はともにPIVを用いて行った。カメラはKodak ES1.0(1018×1008pixel, 8bitモノクロ)、を

使用し、照明としてYagレーザー(New wave 製, 120mJ)を用いた。トレーサーは、気流側に超音波加湿器による水蒸気(粒径10 μ m程度)を使用し、水流側には、ナイロン12粒子(粒径約50 μ m, 比重1.02)を使用した。気流と水流の計測は流速のオーダーがおおよそ2桁異なるため、別々に計測を行った。

PIV解析に撮影した画像は、同一条件で2種類の画角サイズ(約3×3cmと約8×8cm)の撮影を行い、比較検証として用いた。全ケースの撮影枚数を1640枚とし、12Hzでレーザーを照射してサンプリングを行ったため、1ケース当たりの計測時間は、水流、気流ともに約68.3秒となった。また、解析に用いたウィンドウ・サイズは32×32pixelとし、50%オーバーラップでベクトルを算出した。32pixelの実寸法は、画角サイズ3cmで約1mmとなり、約0.5mm間隔でベクトルの算出を行ったことになる。なお実験の条件は、 $U_{max} = 1.3, 2.5, 3.9$ m/sの3種類の風速を与えて、吹送流を発生させ、気流・水流の計測を行った。

3. 実験結果

まず水平方向の平均流速分布に対数則分布を適用して求めた摩擦速度によって、気層側と液相側から水面に作用するせん断応力を求めた。本研究では波がほとんど発生しない条件下において行われていることから、気流側のせん断応力が100%水側に伝わるはずであるが、気流側と水流側のせん断力比を求めると、Table 1 のようになる。

細心の注意を払って対数則を当てはめたにも関わらず、 $U_{max} = 2.5$ m/sのケースでは、気流側のせん断応力

Table 1 Shear stress calculated from log-law profile

$U_{\max}$ [m/s]	τ_a [Pa]	τ_w [Pa]	τ_w/τ_a
1.3	$4.87 \cdot 10^{-3}$	***	***
2.5	$1.26 \cdot 10^{-2}$	$1.48 \cdot 10^{-2}$	1.17
3.9	$3.40 \cdot 10^{-2}$	$2.81 \cdot 10^{-2}$	0.82

が水流側のせん断応力を下回る結果となってしまった。この原因のとして平均水面位置の特定の困難さが挙げられる。風洞水槽内で風を発生させると、気流の静圧勾配により平均水面が下流側では上昇し、上流側では下降する。また、吹き寄せ効果によっても同様の現象が生じるため、計測位置によっては静水面と平均水面とは必ずしも一致しない。規模の大きな計測であれば多少の誤差は問題とならないが、本研究では、1mm 以下のスケールを対象としていることから、この影響が大きく出ているものと推察される。実際に平均水面位置を 1mm 恣意的に変化させれば、摩擦速度はおおよそ 10% 変化し、結果としてせん断応力は 20% 程度の差が生じることとなった。

次に、対数則が成り立つ乱流境界層は、一般にレイノルズ応力が一定となる領域であり、レイノルズ応力の平均値から、せん断応力を求めることができる。また、粘性底層内では、別にせん断応力を求めることができる。しかしながら、気流側の粘性底層は極めて薄い層であり、事実上計測はできず、水流側も粘性底層はあるものの粗度高さが大きく、厳密に粘性底層の式が成り立つのかについて疑問が残る。本研究では、水面を挟む気流と水流にこれが適用できるかについて確かめてみた。Fig. 1 は、気流(上側)と水流(下側)のレイノルズ応力と分子粘性応力およびその合計した応力の鉛直分布である。

気流側、水流側ともに水面に近づくにつれて分子粘性応力が卓越しており、それに対応してレイノルズ応力がゼロに近づいていく、粗度高さや壁面乱流における粘性底層厚に比べて、はるかに分子粘性応力が影響する範囲は広く、気流側に対数則を当てはめた領域でさえも分子

粘性応力の影響がゼロとは言えない。水流側においては、さらに分子粘性応力の影響範囲は広く、下層においても全応力の数%から 10% 程度が分子粘性応力によるものとなっている。

レイノルズ応力については、気流側では乱流境界層内で一定値となっていない。 $U_{\max} = 2.5$ や 3.9 m/s のケースを見ると平均流速分布には現れなかった構造的な流れの存在があるようにも見える。一方、水流側のレイノルズ応力については、ばらつきはあるものの乱流境界層内では、鉛直方向にほぼ一定値となっており、レイノルズ応力だけでなく、分子粘性応力も含めた全応力を見れば、水面近傍までほぼ一定の値を取っていると判断できる。この全応力から水面に作用するせん断応力を求めると、Table 2 のようになる。

Table 2 Shear stress calculated from total stress

$U_{\max}$ [m/s]	τ_a [Pa]	τ_w [Pa]	τ_w/τ_a
1.3	$3.73 \cdot 10^{-3}$	***	***
2.5	$1.15 \cdot 10^{-2}$	$7.46 \cdot 10^{-3}$	0.65
3.9	$2.40 \cdot 10^{-2}$	$2.06 \cdot 10^{-2}$	0.85

偶然ではあるが、 $U_{\max} = 3.9 \text{ m/s}$ のケースは、摩擦速度から求めた比率とほぼ一致する結果となった。しかしながら、気流側、水流側ともに摩擦速度から求めたせん断応力に対して小さな値となっている。

結局、様々な方法で水面を挟んだせん断応力の連続性について検討を行ってきたが、気流側のせん断応力のうち、一部についての行方は分からないままである。この原因として、まず、水路内の横断方向流速がゼロであることは、特に水流側ではあり得ない。水路内では 2 次流が発生しており、水路横断方向との相関成分 $\rho u'v'$ が $\rho u'w'$ の 1/2 でもあれば、上記の差異の分は十分に説明がつくと考えられ、水側の 3 次元性的流動性がせん断応力の連続性について強く影響していると考えられる。

4. 結 語

本研究では、風洞付き水槽を用いて吹送流に対し、水面ごく近傍の微小領域の可視化計測を行って、水面を挟んだせん断応力の連続性について検討を行った。主要な結論は以下の通りである。

- (1) 分子粘性応力の影響は、粘性底層厚や粗度高さのスケールを超えてかなりの広い範囲に及んでおり、特に水流側は、かなり深い水深でも数%~10% 程度の影響が生じていることが分かった。
- (2) 分子粘性応力とレイノルズ応力の分布から、せん断応力の連続性については、水流側の 3 次元性的の影響が大きいことが推察された。

参 考 文 献

- 1) 光 易 恒, 草 場 忠 夫, "大気海洋間の運動量交換(2)", 九州大学応用力学研究所所報, 第 66 号(1988), pp. 21-35.

Fig. 1 Vertical profile of Reynolds stress and