

風洞水槽における有義波高の影響を考慮した鉛直風速分布に関する考察

A study on vertical wind speed distribution considering influence of significant wave height using wind tunnel experiment

北海道大学工学院 ○学生員 大山高弘(Takahiro Ohyama)

北海道大学大学院工学研究院 正員 山田朋人(Tomohito Yamada)

北海道大学大学院工学研究院 正員 渡部靖憲(Yasunori Watanabe)

土木研究所寒地土木研究所 正員 大塚淳一(Junichi Otsuka)

1. はじめに

大気境界層は大気と地表面（海面・陸面）における運動量、水熱フラックスを考える上で極めて重要である。大気海洋間の相互作用は、運動エネルギーや、物質のやりとりを通じて行われる。その過程を担っているのは海面上の風波である。風波は古くから多くの研究者によって着目されてきた現象でありながら、いまだ十分な物理機構が解明されていない困難な研究課題である。

大気海洋相互作用について議論する上で重要となる素過程として飛沫の発生過程が挙げられる。ハリケーンのような強風下における海上では飛沫液滴数は激増する。飛沫は空中に飛んでから、一秒間以下の短時間に風速と同程度の速度に加速し、そして風から運動量を奪う。飛沫が下方の運動量フラックスにどのような影響を与えているかは未だ不明瞭であるが、雨滴とは異なり、輸送される飛沫の量は局所的風速によって決定されるとの指摘がなされている。Andreas(2004)の解析結果によれば、飛沫は海面付近の風速を弱めるということが示されており、その効果を加味した場合、地表面から 10m の高さにおける風速 36m/s が 3m/s だけ遅くなることを示した。また強風速は波を立たせ、より多くの飛沫を生むが、逆に飛沫は海表面に戻り、波をつぶす方向に働く。このように飛沫は大気海洋運動量輸送を限定するネガティブフィードバックに重要な役割を果たしている。海表面より 10m 高さにおいて風速が 30~40m/s の場合、全応力 τ は風速に伴い増加する。全応力 τ は摩擦速度 u_* の二乗に比例するとしている。

$$\tau = \rho_a u_*^2 \quad (1)$$

また Andreas and Emanuel(2001)は飛沫応力 τ_{sp} の式を Emanuel(1995)の熱帯低気圧モデルに組み込んだ。

$$\tau_{sp} = 6.2 \times 10^{-5} \rho_w u_*^4 [N/m^2] \quad (2)$$

U と u_* の関係は以下の二式によるものである。

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (3)$$

$$z_0 = 0.0185 \frac{u_*^2}{g} \quad (4)$$

式(2)が表す風速の上昇に伴う飛沫応力の増加は観測が困難であり、かつ検証が不十分である。これについて本研究では風洞実験を用いたアプローチを行う。これは最下層風速の理解に繋がり、海上における強風速の予測精度を向上させるうえで貴重なデータとなろう。本論文では風波発生後の風速と波高との関連性について議論する。2 章では実験手法の説明を行い、3 章では実験条件における風速分布について、4 章では考察及びまとめを記す。

2. 実験概要

2.1 実験装置

本実験は土木研究所寒地土木研究所にて、二次元造波水路（風洞型）を用いて実施した。波高計測、風速計測、気圧計測、水圧計測、高速カメラによる飛沫と波面形状の観測を行った。また、最大瞬間風速は約 18m/s である送風機を使用した。使用する水槽は幅 0.6m、高さ 1.5m、長さ 27m であり、そのうち計測対象範囲は 10m 程である。なお、水路の循環はなく、波の反射については議論を行わない。

2.2 実験観測データ

出力風速は 10、12、13、14、15、16m/s の 6 ケースで実験を実施した。

図-2 は 6 ケースごとに静水面から上部方向に 0.2m~0.6m まで 2 cm 間隔で風速計測を行い、毎秒観測データを 2 分間計測し、平均風速[m/s]を算出した値をまとめたものである。摩擦速度を求める際は 0.2~0.34m までの高さ風速が対数風速分布に近いと、これらの値を使用し、得られた値をまとめたものが図-3 である。また、2 分間平均データを採用した理由としては、静水面より 0.2m 高さにおける 1 分間平均データ風速値が 15.3±1.01 である一方で、2 分間平均データ風速値が 15.4±0.65 という結果になったためである。わずかな違いではあるが平均値のばらつきを抑えるため、こちらを採用した。次に、(3)式に(4)式と観測データを代入し数値的に解くことにより、摩擦速度を算出し、その値と高さ $z = 10m$ を代入することにより U_{10} を求める。それらの値をまとめたものを図-4 に示す。

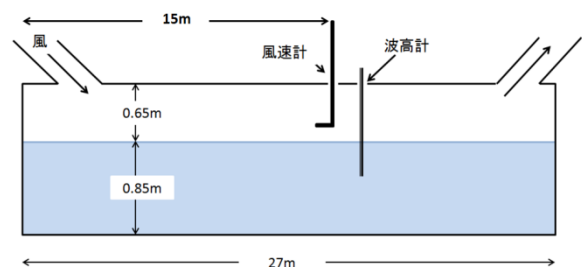


図-1 実験装置。上部 0.3m は木箱。下部 1.2m はガラス製容器。幅は 0.6m。風速計は水槽中心線上に、波高計は中心線から 9 cm 離して横並びに設置。

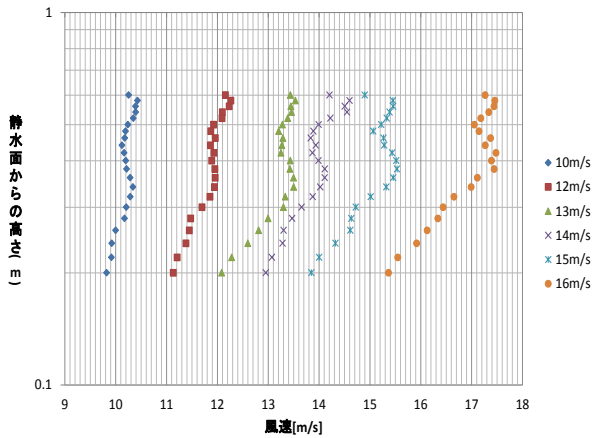


図-2 風速データの高さごとの平均値。風速計の観測上限部は箱上部より 5 cmまでとし、静水面より 0.2～0.6m 高さにおいて 2cm 間隔で計測。

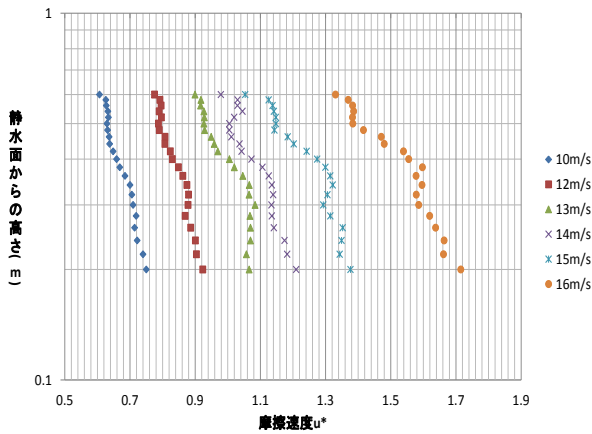


図-3 高さごとにおける摩擦速度。これらの値は図-2 の風速データに対応している。

0.2m高さの観測データを使用		
$U/0.2m$	$U/10m$	u^*
9.821400778	17.1559669	0.749951
11.13308271	20.16505334	0.923509
12.08416667	22.50675357	1.0657
12.95166667	24.78473795	1.20992
13.8475	27.31062732	1.37659
15.36639344	32.13812819	1.71489
0.2m～0.34mの平均データを使用した場合		
平均風速	$U/10m$	u^*
10.08267148	16.61896788	0.720079625
11.51770533	19.59089696	0.889591875
12.86288002	22.54703697	1.0682
13.45366753	23.95138819	1.15648875
14.55917175	26.64891057	1.33224125
16.17261591	30.993269	1.63230625

図-4 観測データから得た $U_{10}(m/s)$ と摩擦速度 u^* 。
0.2m 高さの風速観測値と 0.2～0.34m 高さ平均の風速観測値を使用

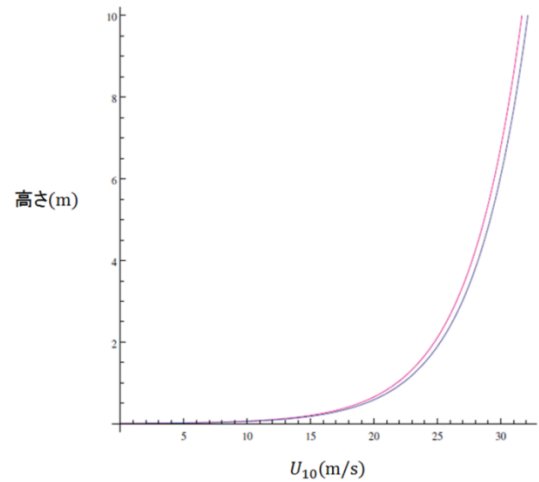


図-5 飛沫の効果を考慮し実験データを与えた対数風速分布(赤線)と従来の対数風速分布

3. 実験データの解析

飛沫の発生が対数的風速分布に与える影響について求めるには Andreas(2004)の以下 2 式を用いる。

$$A_{1/3} = 0.015U_{10}^2 \quad (5)$$

$$\frac{dU}{dz} = \frac{u_*}{kz} - \frac{6.2 \times 10^{-5} \rho_w u_*^3}{2 \rho_a k z} \exp\left(\frac{z \ln b}{2A_{1/3}}\right) \quad (6)$$

$A_{1/3}$ は有義波高、 ρ_w は水の密度、 ρ_a は空気密度、 z は海表面からの高さを表し、 k はカルマン定数(0.40)である。 b は 0.001 をとる定数である。0.2m 高さの観測データを使い、10m 高さの風速が減少するのかどうかを検証したものが図 - 5 である。実験時の有義波高は 0.14m である。

4. まとめ

4 章における解析結果において、飛沫が海上風速に及ぼす影響はごくわずかではあるが、風速を減少させる方向に働いていることが分かった。ただし、Andreas(2004)の解析結果ほど顕著な現象は見られなかった。要因としては、(5)式を見れば明らかであるが、本実験において得られた有義波高は実際の海上のものと比べはるかに小さく、それが理由として挙げられる。

今後の予定は飛沫の効果を考慮した鉛直風速分布の推定を行う予定である。

参考文献

- 1) Andreas E. L. :Spray Stress Revi
- 2) E. L. Harrison, F. Veron, D. T. Ho, M.C. Reid, P.Orton, and W. R. McGillis :Nonlinear interaction between rain- and wind-induced air-water, Jouranl of Geophysical research, Vol117, doi:10,2012
- 3) 鳥羽良明:大気・海洋の相互作用、第 1 章、p4-6、1996.