

風波が発達した界面下の吹送流特性

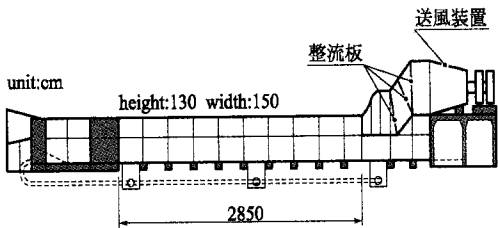
水谷 夏樹*・橋本 典明**

本研究は風洞水槽実験による吹送流の特性について検討を行った。計測には高速ビデオカメラを用いた画像計測法を採用し、PIV による風波内部速度場の算出を行った。また波高計との同期計測を行い、波高計直下における流速の鉛直分布を時系列的に抽出することで時間平均による吹送流の分布を求めた。この実験手法の最大の特徴は、トラフレベル以上の吹送流分布を求めることが可能な点であり、風波の発達が界面下の吹送流分布に影響を及ぼす点について明らかにすることができた。また、トラフレベル以上で輸送される実質の流量が相当量存在することを示し、吹送流の予測計算において波浪の存在を無視することができないことも併せて明らかとなった。

1. はじめに

吹送流の研究は流体力学的に古典的問題であり、古くから多くの研究が行われている (Shemdin, 1972; Wu, 1975; 加藤, 1976; 鶴谷, 1987; Cheung・Street, 1988)。一般に吹送流は水面下の流速分布が対数則によって表され (Phillips, 1977), 表面流速は 10 m 高度の海上風速の約 3 % 程度という事実がよく知られている (Wu, 1975)。しかしながら、風波が発達した界面付近を精度良く計測する方法は、近年開発されてきた画像計測法を用いる以外にあまりなく、従来の研究は風波のトラフレベル以下の議論が中心であることから、直接風が駆動する表層付近の運動機構は未解明のままである。また、室内実験における吹送流の研究は界面活性剤の投入による風波の発生を抑制した場合や比較的小規模な水槽による風波の発達の初期段階における研究が主であることから、白波砕波が発生するような風波が激しく発達した場合の吹送流の議論は、計測の困難さも手伝ってほとんど行われていない。

以上の背景を踏まえて、本研究では風洞水槽実験結果に基づいた吹送流 (質量輸送流) の特性について論じる。計測には高速ビデオカメラを用いた画像計測法を採用し、PIV による風波内部速度場の算出を行った。また波高計との同期計測を行い、画像内における正確な水面位置の決定を行うと共に波高計直下における流速の鉛直分布を時系列的に抽出することで時間平均による吹送流の分布を求めた。この実験手法の最大の特徴は、トラフレベル以上の吹送流分布を求めることが可能な点であり、風波の発達が界面下の吹送流分布に影響を及ぼす点について明らかにすることができる。また、トラフレベル以上で輸送される実質の流量が相当量存在することを示し、吹送流の予測計算において波浪の存在を無視することができないことも併せて示す。



図一 実験水槽の概要

2. 実験手法の概要

実験は図一に示すように、国土技術政策総合研究所が所有する風洞水槽 (計測部の長さ 28.5 m × 幅 1.5 m × 高さ 1.3 m) を用いて行い、水深を 53 cm に設定した。風速は送風機の回転数を 200, 300, 400 rpm の 3 通りに設定し、水槽内の 5 か所 (W01~W05) において平均風速の鉛直分布を計測するとともに、W01 を除く 4 か所において水面変位の計測を行った。計測条件を表一に示す。平均風速については熱変換タイプの風速計 (カノマックス製: 温度補償付, 応答周波数 0.1 Hz) を使い、サンプリング周波数 10 Hz で 60 秒 (データ点数 600 点) の計測を行って各高さの平均値を求めた。また、水面変位については抵抗線式波高計 (ケネック製: 応答周波数 30 Hz) を使い、サンプリング周波数 200 Hz で 656 秒 (データ点数 131,200 点) の計測を行った。

PIV による流れの計測は、光源に 6 W の Ar イオンレーザー (Spectra-Physics 製) を使い、光ファイバーによって計測点直下まで導入した後、シリンドリカルレンズによってシート光にして水中に照射した。水中に混入

表一 計測点の吹送距離と基準風速

	fan [rpm]	W01	W02	W03	W04	W05
fetch [m]		1.40	5.47	11.35	17.34	23.23
U_r [m/s]	200	6.152	6.417	6.735	6.941	7.488
	300	9.158	9.877	10.155	10.073	10.829
	400	12.168	12.718	13.447	13.272	14.085

* 正会員 博(工) 大阪産業大学助教授 工学部都市創造工学科
** 正会員 工 博 (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部海洋水理研究室長

表-2 画像計測における撮影条件

	画像サイズ	200 rpm	300 rpm	400 rpm
フレームレート [fps]	15/23 cm	60	125	250
シャッター スピード [s]	15 cm	1/250	1/500	1/1000
	23 cm	1/250	1/500	1/500

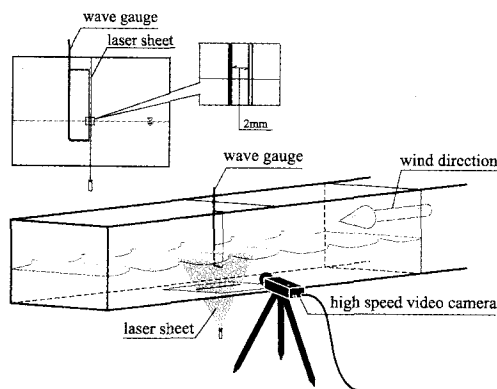


図-2 PIV計測の概要

したトレーサー粒子は、粒径 $150\ \mu\text{m}$ 、比重 1.2 の塩化ビニル白色粒子を用い、レーザーによって可視化された粒子を高速度ビデオカメラ（フォトロン製； 512×480 pixel）によって撮影した。カメラの撮影範囲は約 15×15 cm と約 23×23 cm の 2 通りを設定し、フレームレートおよびシャッタースピードはそれぞれの風速下における波速と水粒子速度を勘案して風速別に設定した（表-2 参照）。高速度ビデオカメラのメモリの制限により、一度に撮影できる画像の枚数が 2184 枚であることから、同じ条件下において連続して 6～15 回の撮影を行った。また、先の予備計測とは別にレーザーシートに近接（約 2 mm）して容量式波高計を設置し（図-2 参照）、高速度ビデオカメラと同期させて画像中央における時間波形の記録を行った。また、解析には市販の PIV ソフトウェア（TSI 製；Insight）を用い、 32×32 pixel の検査領域を設定して、50% オーバーラップさせ、 31×29 の速度ベクトルを算出した。

3. 実験結果と考察

（1）吹送流の分布特性

画像計測法は水面付近を非接触に計測が可能で、同時に流速の空間分布を得ることができるため、従来不可能であった風波のトラフレベル以上の計測が可能となる。小笠原ら（2003）は、PIV を用いて平均水面以下の吹送流分布を求めているが、波による水面の変動を小さいと仮定して無視し、固定した水面として平均水面までの鉛直分布を算出している。また村上ら（2001）は、PTV

を用いてトラフレベル以上の流速場を算出している。彼らは波動成分を除いた吹送流の分布が波の位相に依存するとし、位相ごとのアンサンブル平均を求め、さらにそれを一周平均して平均流を求めている。しかし、アンサンブルに用いるサンプル数が少ないほか、系統的な実験が行われておらず、限られた知見に留まっている。

通常、画像を用いた PIV 計測は、2 枚の画像内に写った中立粒子の空間分布より、相互相関係数が最も高くなるようなマッチングを選択して流速を得る。本研究ではオイラー流速の平均流を求めるため、画像中央に設置された波高計により画像内における正確な水面位置を把握し、その直下の瞬時流速の鉛直分布を時間方向に 2183 個並べて、波高計直下における瞬時流速の時空間ベクトル図を作成した。PIV による各流速ベクトルは、グリッド上の固定点において求められるため、各高さごとに時間平均を求めることができる。時間平均を求める際、トラフレレベル以上では時間的に液相と気相が交互に存在するが、本研究では気相にあたる領域の流速をゼロとして総和をとり、全時間で除することによってフラックスに相当する平均流速分布を求めた。また、400 rpm のケースではフレームレートが 250 fps であるため、一回の撮影時間内（8.736 秒）に高々 15～20 波程度の波しか撮影することができない。従って、同じ条件で繰り返し撮影したケース（6～15 回）を全て平均し、十分な数の波に対して平均流を求めた。

図-3 は、風速ごとに平均された水平流速の鉛直分布である。各図の風洞の回転数は (a) 200 rpm, (b) 300 rpm, (c) 400 rpm である。吹送距離による比較を行うため、各図共に W03 および W05 での結果を併せて示しており、それぞれの吹送距離におけるトラフレレベルの鉛直位置を図中の実線および破線によって示している。ここでトラフレレベルの定義については、2183 個の時空間ベクトル図において、全てのベクトルデータが存在する領域を水中に没した領域とた。

各図の分布を見るとトラフレレベル以下では水深増加に伴って単調減少になっている。一方、トラフレレベル以上では、平均水面（ $z=0$ ）付近で最大となり、クレストに向かって減少する分布となっている。個々の波の鉛直分布を見ればクレストで最大水平速度を持つが、時間軸で見るとクレストに向かって出現頻度が減少するためクレスト付近でのフラックスはゼロとなる。また吹送距離による変化について見ると、いずれの風速もトラフレレベル以下では W03 よりも W05 の分布の方が流速の値が小さく、傾きも小さい。摩擦速度から計算される水面に作用するせん断力は、吹送内ではほぼ一定の値を示しており、吹送流は吹送距離には依存しないものと予測された。従来の研究では、吹送距離の短い小型の風洞で行われたも

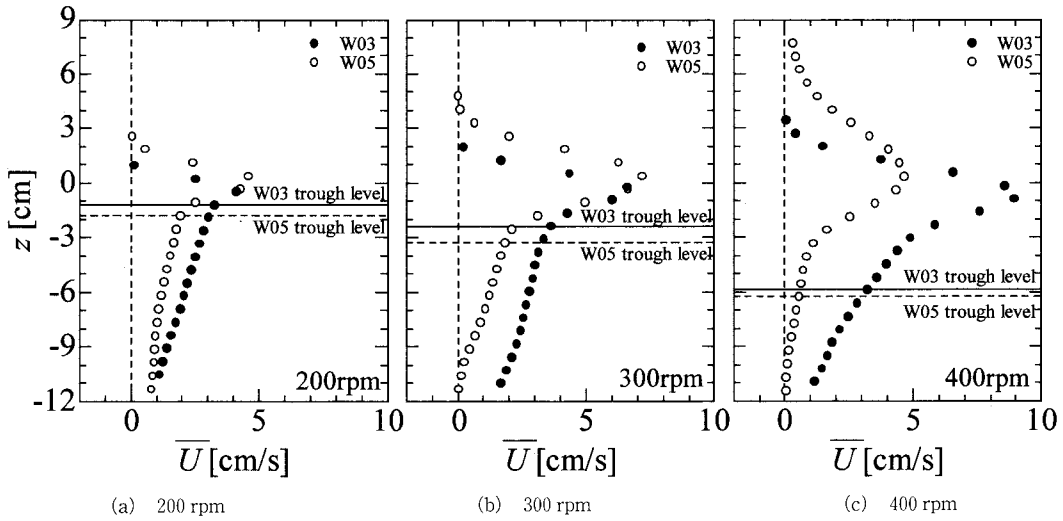


図-3 平均水平流速の鉛直分布

のが多く、吹送流の吹送距離による変化について検討されているものはあまりない。しかし、石川ら (1988) は現地湖沼における観測において水面に波浪が発達する場合は、水面下の吹送流分布が対数則には従わず、鉛直方向に一様化することを指摘している。また Cheung・Street (1988) は、風洞水槽内で風を吹かせた場に造波機で重力波を発生させると、吹送流の値が全体的に小さく、鉛直分布の傾きも小さくなることを見いだしている。そしてそれらの要因として波浪の発達によるシェルトリングの効果を指摘しており (Bole・Hsu, 1969)、波のクレストから風下側のトラフに向かって気流が剥離することから、その分のせん断力が水側に伝わらないためと説明している。いずれにしても、同じ程度のせん断力が作用しているにも関わらず波浪の発達により水面下の吹送流分布が小さくなることは、これまでの吹送流のモデル化とは相反する事実を示しており、波浪の影響を考慮した吹送流分布のモデル化が必須であることを示している。

次にトラフレベル以上について吹送距離による変化を見てみると、200 rpm と 300 rpm については W03 よりも W05 の方が最大平均水平流速の値が大きい。しかし、400 rpm については W05 の方が、W03 より大幅に値が小さい。この点については、ベクトルの時空間分布を詳細に見直した結果、400 rpm の W05 のケースでは、高風速と長い吹送距離の影響で風波が激しく発達し、白波砕波による気泡混入が影響して流速の計算値にエラーが多数発生していることが分かった。図-4 は、400 rpm/W05 の場合の 23 cm の空間スケールで計測した PIV の結果と 15 cm のスケールで計測した PIV の結果を比較したものである。両者の比較から、W03 では、トラフレベル以上の分布がよく一致するのに対し、W05 の結果は大きく

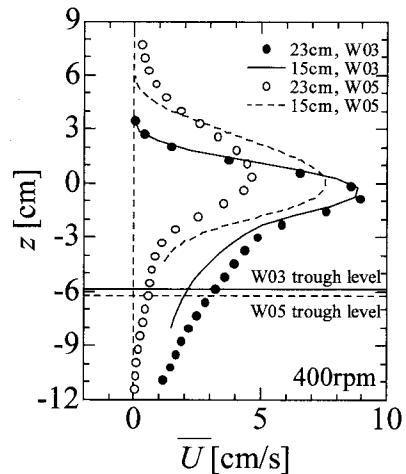


図-4 400 rpm/W05 のケースにおける画像サイズによる平均流速分布の比較

異なる。しかし、PIV 計測値のエラーが気泡の影響であるとするれば、15 cm スケールの計測結果も信頼性のあるものではなく、両者を置き換えることはできない。PIV による実験計測は慎重に行われたが、砕波による気泡の混入はレーザー光の散乱を生じさせ、周辺のベクトル計算にエラーを生じさせる。画像計測によりトラフレベル以上の計測が可能となったが、高風速時の計測は画像計測をもってしても、未だに困難であり、今後さらに計測法の改良が求められる。

次に鉛直流速の鉛直分布について見てみる。図-5 は平均鉛直流速の鉛直分布の比較であるが、平均水面 ($z=0$) 付近で下降流が最大となり、トラフレベル付近でゼロに近づく。しかし、その値は最大でも 1 cm/s 以下であ

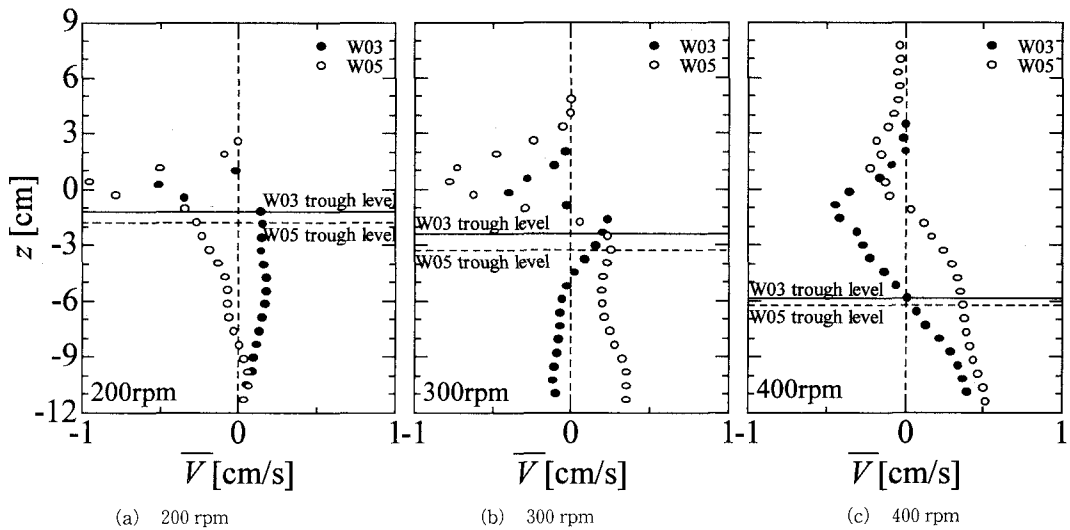


図-5 平均鉛直流速の鉛直分布

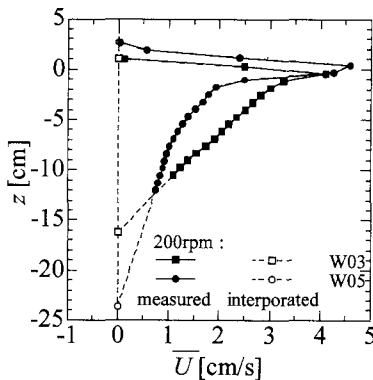


図-6 流速分布の線形補間の一例

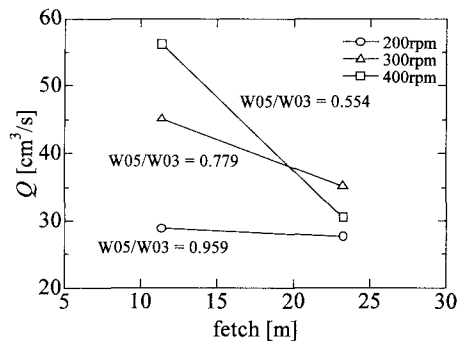


図-7 流下流量の連続性

り、全体的に非常に小さく鉛直方向の平均的な質量輸送はほぼゼロであると判断される。

(2) 流下流量の連続性

図-5より鉛直方向の質量輸送量がほぼゼロであることが分かったが、これに水路横断方向の質量輸送量をゼロと仮定すると水平方向流速の分布を鉛直方向に積分することによって断面を通過する流下流量を求めることができる。本研究では、水平方向流速の鉛直分布を積分するにあたり計測範囲内でゼロ線と交差しないものについては図-6のように流速分布を直線分布で補完することによって求めた。

図-7は、W03とW05を通過する流下流量を比較したものである。前述の仮定が成り立つならば流下方向に流量の連続性が成立するはずであるが、実際にはそうならず、流下方向に流量が減少している。200 rpmのケースでは約96%の流量が保存されているものの、

300 rpmのケースでは約78%しか保存されていない。なお、400 rpmのケースは前述のようにW05の流速分布にエラーを含んでいることから保存性を評価することはできない。流下流量の連続性が成り立たない要因としては、計測誤差に起因するものと流速分布の直線補間に起因するもの、さらに水路横断方向の質量輸送量をゼロと仮定したことによるものが考えられるが、両側をガラス壁で囲われた風洞水槽内においては、ガラス壁の摩擦の影響によって流下方向に軸を持つ複数の二次旋回流が発生することが知られている(松永・鶴崎, 2002)。したがって、水路横断方向の質量輸送量はゼロとはならず、その分の流下流量が減少したものと考えられる。

この流下流量を無次元吹送距離で整理したものが、図-8である。図から400 rpm/W05のケースを除いて無次元吹送距離の対数式によって明確に表すことができる。本研究で得られた対数式は以下であるが、

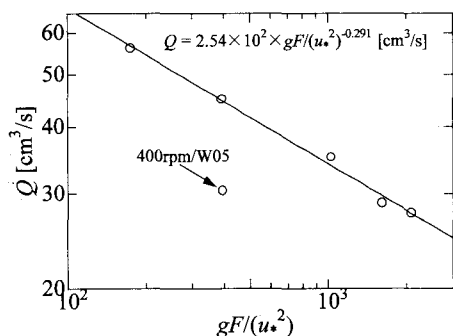
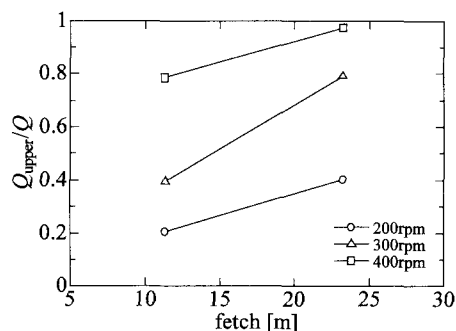


図-8 流下流量と無次元吹送距離の関係

図-9 全流下流量 Q に対するトラフレベル以上で輸送される流量

$$Q = 2.54 \times 10^2 \left(\frac{gF}{u_*^2} \right)^{-0.291} \dots\dots\dots (1)$$

この式を用いて 400 rpm/W05 のケースの流下流量を推定すると $Q = 44.85 \text{ cm}^3/\text{s}$ となり、W03 に対する保存率は $W05/W03 = 0.798$ から約 80% が保存される。

さらにこの推定された流下流量を用いてトラフレベルより上の領域で輸送される流量の割合を算出した。図-9 は全流下流量に対するトラフレベルより上で輸送される流量の割合を表したものである。風速の増大および吹送距離の増大に伴って風波が発達するためトラフレベルより上の領域で輸送される流量は増加するが、最も風波が発達しない 200 rpm/W03 のケースでも約 21% が波によって輸送され、最も風波が発達する 400 rpm/W05 のケースでは実に 97% もの流量が波によって輸送されていることが分かる。これは 400 rpm/W05 のトラフレベル以下の流量が極端に少ないため波に輸送される流量の割合が極めて高い結果となった。現地海洋観測においては有義波高の 5 倍以上の深いところでも明らかに風によって流れが発生しており、風洞水槽内における流れ場の様子は現地のそれとは一致しない。この原因の一つには風洞水槽内には底層に補償流が発生し、吹送流とは逆向きの流れが発生することから、それによる影響で全体の流下流量が調整されていることが考えられる。しかし

ながら、それらを踏まえても波によって輸送される流量は無視できないオーダーであり、現在の吹送流モデルが波の存在を無視しているという事実は、早急にこれを是正しなければならない問題であると言える。

4. ま と め

本研究では、風洞水槽において風波が発達した状況下における吹送流の特性について検討を行った。計測には画像計測法を用い、PIV によってトラフレベル以上を含む流速分布を求めた。以下に主要な結論をまとめる。

1. 平均水平流速の鉛直分布は、波浪が発達するにつれてトラフレベル以下の吹送流が弱まることが分かった。
2. 平均鉛直流速の絶対値は小さく、鉛直方向の質量輸送量は無視できることが分かった。
3. 全流下流量は流下方向に連続性が満たされず、その原因としては二次旋回流による水路横断方向の質量輸送流が無視できない量であると推察された。
4. 全流下流量は、無次元吹送距離でうまく整理することができると分かった。
5. トラフレベルより上の層で輸送される流量は、最大で 95% を超えており、波浪による影響を無視することが出来ないことが分かった。

謝辞：本研究は、文部科学省科学技術振興調整費若手任期付支援研究費による成果であることを付記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 石川忠晴・田中昌宏・小関昌信 (1988): 湖面に働く風応力の現地観測, 第 32 回水理講演会論文集, pp. 305-310.
- 小笠原敏紀・久保田踊児・安田孝志 (2003): 白波砕波を伴う強風時吹送流の平均水面直下の鉛直分布とそのモデル, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 351-355.
- 松永信博・鶴崎賢一 (2002): 吹送流中の二次循環流に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 705/II-59, pp. 67-82.
- 加藤 始・鶴谷広一・土肥俊満・宮崎 豊 (1976): 流れの中の風波についての実験的研究 (第 2 報), 港湾技術研究所報告, 第 15 巻, 第 4 号, 48 p.
- 鶴谷広一 (1987): 海域における乱れと物質輸送に与える風の効果に関する研究, 東京工業大学博士学位論文, 182 p.
- 村上晴道・加藤 始・信岡尚道 (2001): PTV を用いた風波の表面付近の流速場に関する実験的研究—主として軌道速度の分離について—, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 381-385.
- Bole, J. B. and E. Y. Hsu (1969): Response of gravity water waves to wind excitation, J. Fluid Mech., vol. 35, pp. 657-675.
- Cheung, T. K. and R. L. Street (1988): The turbulent layer in the water at an air-water interface, J. Fluid. Mech., vol. 194, pp. 133-151.
- Phillips, O. M. (1977): The Dynamics of the upper ocean, 2nd ed., Cambridge Univ. Press, 336 p.
- Shemdin, O. H. (1972): Wind-generated current and phase speed of wind waves, J. Phys. Oceanography, vol. 2, pp. 411-419.
- Wu, J. (1975): Wind-induced drift currents, J. Fluid. Mech., vol. 68, pp. 49-70.