

# 風波生成時の水面形状変化に関する研究

Study on water surface shape change during wind wave generation

北海道大学大学院工学院 ○学生員 黒田晴希 (Haruki Kuroda)

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

## 1. はじめに

静水状態から風によって風波が発生・発達する機構として一般的には Phillips の共鳴理論と Miles 機構が知られている。Phillips の共鳴理論によれば静水状態から吹送による圧力変動の速度と波長が水の波の位相速度と一致し風波が発生するとされ、実際に風向きと直交する長波峰を持つ 2 次元の水面形状の表面張力波が初期に現れその後短波峰の 3 次元形状で特徴付けられる不規則波へと遷移することが確認されている(Kawai 1979)<sup>1)</sup>。Miles 機構では初期波形成後断面二次元的な波面上の気流の不安定性から波浪が発達するとされている。

しかし、波の 3 次元形状が風波発達にどのように寄与しているのか、また 3 次元形状から 2 次元形状の風波へ遷移するメカニズムは明らかになっていない。

本研究は、面的水位の動的計測を可能とする Diffusive Light Photography (以降 DLP) を風洞水槽実験に適用した。渡部・黒田(2022)<sup>2)</sup>では DLP の面的水位の動的計測が妥当だと分かっている。

本論文では渡部・黒田(2022)<sup>2)</sup> に追加実験を行い、フェッチ及び風速をパラメータとした水面形状及び波数スペクトルの特徴を議論する。また風洞水槽内の水の流れを可視化するために粒子画像流速測定法 (以降 PIV) を用いて計測していくための予備実験を行った。

## 2. 実験装置

鉛直方向に循環するゲッチンゲン型小型風洞水槽において実験を行った (図-1)。上部の風洞内に設置されたファンにより生成された気流は循環部を経て風洞下面に粗度が設置された 0.6m の整流部を経由し、水槽内に溜められた水の水面上を通過する。水槽部は 2m、幅 0.1m、深さ 0.2m であり、水面から風洞上壁までの高さは 0.14m である。整流部と水槽部の境を原点とし気流の方向を正とする水平方向に  $x$  軸、風洞横断方向に  $y$  軸、鉛直方向に  $z$  軸を定義した。

## 3. 風速分布と風波諸元

風洞ファンの出力 25%, 50%, 75%, 100% の風に対して、フェッチ  $X=0.25, 0.50, 0.75, 1.00$ m の位置で実験を行った。全てのファン出力、計測位置において、ピトー管式風速計を鉛直方向にトラバースし、風速分布を計測した。

図-2 は、それぞれのファン出力  $P$  とフェッチ  $X$  における風速の鉛直分布を表している。

容量式波高計で水槽幅中央での水位の有義波高と有義周期を計測した (図-3, 図-4)。有義波高は高出力で高く、単調に増加していく。一方有義周期においても高出力の方が周期は長くなるが、フェッチ  $X=0.5$ m までは周

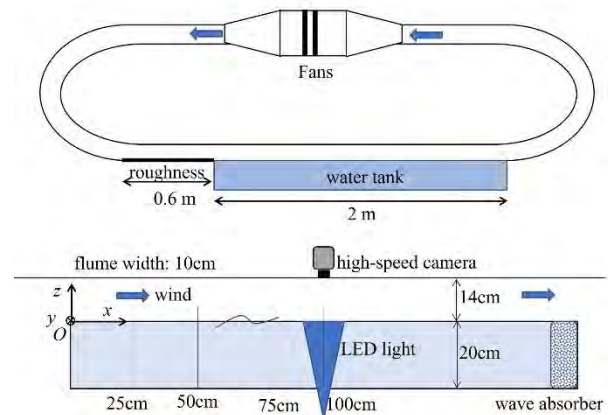


図-1 実験装置と座標系; 風洞水槽全体図と水槽部

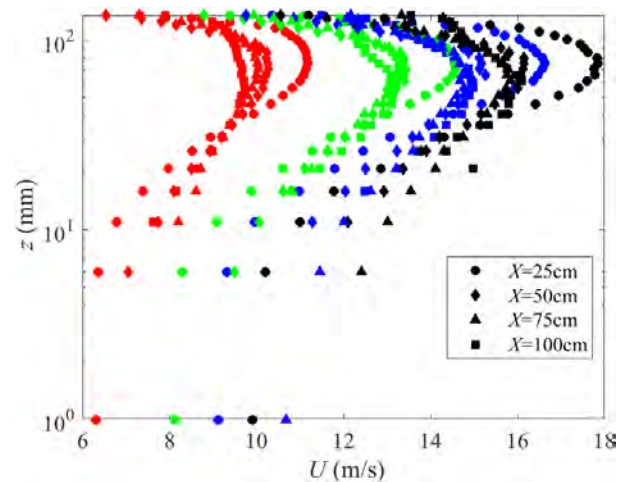
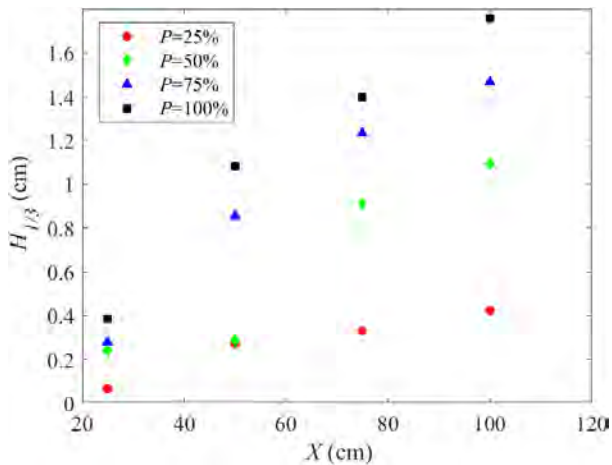
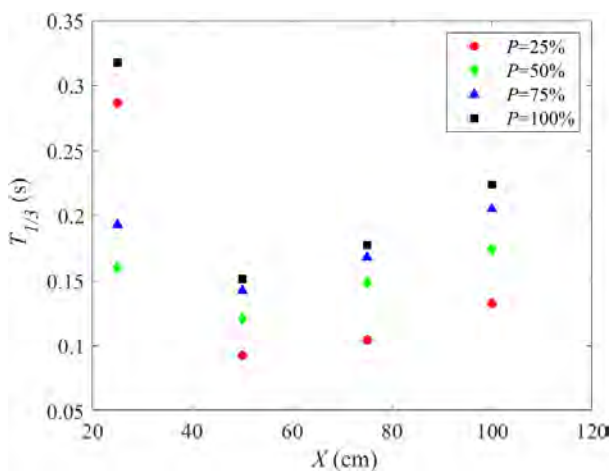


図-2 風速分布(赤:  $P=25\%$ , 緑:  $P=50\%$ , 青:  $P=75\%$ , 黒:  $P=100\%$ )

期は短くなっていくが、その後再び長くなっていく。

## 4. 三次元水面計測法

水面全体を計測する方法として DLP を導入した。DLP は水深に応じて変化する散乱光強度の画像から水位の面分布を計測するものである。本実験では、水槽のガラス製底面下から上方に向けて LED ライトを照射し、水中に混入した微粒子からの散乱光を水槽上部に固定した高速カメラにより周波数 500Hz で撮影する。撮影画像の Field-Of-View はフェッチ  $X=0.25, 0.50, 0.75, 1.00$ m の時は  $600\text{mm} \times 1400\text{mm}$ 、フェッチ  $X=1.195, 1.50$  の時は  $900\text{mm} \times 1500\text{mm}$  であり、 $1\text{mm}/\text{pixel}$  の解像度で実験を行った。一方、撮影画像は水面の上下 (画像の奥行方向への変位) に応じて水平画像座標が変化するため、DLP

図-3 有義波高とフェッチ  $X$  の関係図-4 有義周期とフェッチ  $X$  の関係

は水面変化が大きくなると精度が低下するため、水位変動に応じた動的な画像変化が必要となる。ピンホールモデルを考えると、座標  $(x', y')$  は、ピンホールを原点としたカメラ座標  $(x, y, z)$  に対するアフィン変換で与えられると考える。

$$x' = \frac{a_1x + a_2y + a_3}{z}$$

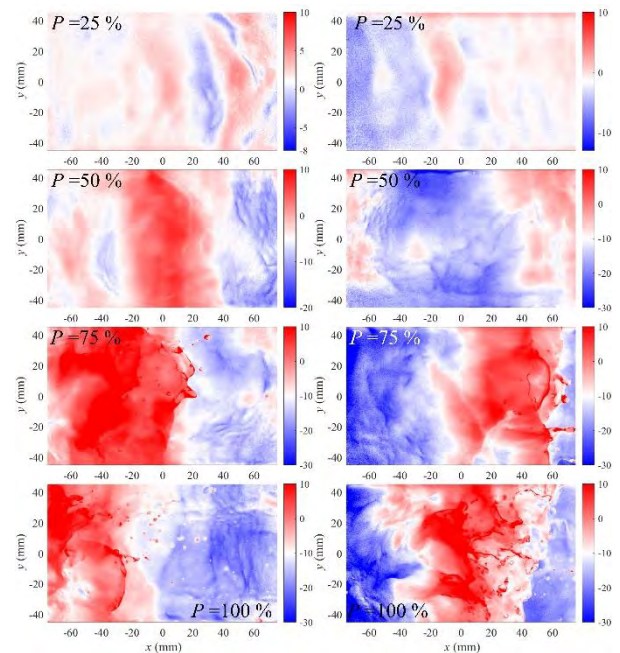
$$y' = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{z}$$

定数  $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$  は、実座標上の格子  $(x, y)$  をカメラの視軸上  $(z)$  でトラバースして撮影し、最小二乗法により決定する。

## 6. DLP 実験結果

### 6.1 水位変動のフェッチ依存性

図-5 はそれぞれファン出力  $P=25\%, 50\%, 75\%, 100\%$  でのフェッチ  $X=1.195\text{m}, 1.50\text{m}$  の典型的な水位分布を比較したものである。  $X=1.195\text{m}$  において、  $P=25\%$  で長さ 1~2 の間隔で  $y$  方向に水位がほぼ一様な長クレストを持つ波長数  $\text{cm}$  の周期波が確認できる。  $P=50\%$  になると長クレストを持つ波長 6 $\text{cm}$  程度の周期波に発達しているのが確認できる。 また、クレスト前面に寄生毛管波が確認でき

図-5 フェッチ  $X=1.195\text{m}$  (左),  $1.50\text{m}$  (右) でのファン出力  $P$  毎の典型的な水位 (カラーバーは水位を表す 単位:  $\text{mm}$ )

る。 また、クレスト前面に寄生毛管波が確認できる (Longuet-Higgins1992)<sup>3</sup>。  $P=75\%, 100\%$  ではクレストの先端がちぎれて飛沫が放出される spume が発生している。

$X=1.5\text{m}$  でも同様に  $P=25\%$  で長さ 1~2 $\text{cm}$  の間隔で  $y$  方向に水位がほぼ一様な長クレストを持つ波長数  $\text{cm}$  の周期波が確認できる。 また  $P=50\%$  で長クレスト長を持つ波長 6 $\text{cm}$  程度の周期波に発達し、寄生毛管波も確認できる。 その後  $P=75\%, 100\%$  では spume が発生している。

### 6.2 時空間スペクトル

水面形を特徴化していくために短時間 3 次元スペクトル解析を行った。 この時、窓関数としてフラットトップ窓を用いて解析を行った。

渡部・黒田(2022)<sup>2</sup>によるとフェッチ  $X=0.25\text{m}$ ,  $P=50\%$  の時の斜めに進む波の  $x$  方向の波長は約 1 $\text{cm}$  である。 この時対応するのは波数  $k_x = 6.3\text{cm}^{-1}$  である。 この波数でスペクトルピークを持つ時空間スペクトルはフェッチ  $X=0.25\text{m}$ ,  $P=50\%$  では  $f = 30\text{Hz}$  である。 そこで、  $P=50\%$  のフェッチ  $X$  毎の  $f = 30\text{Hz}$  の時空間スペクトルを比較する (図-6)。 フェッチ  $X=0.25\text{m}$  では斜め方向成分が強く表れていることが確認できる。 これは初期波形成後に風向きとは異なった方向へ波が伝搬していることを示している。  $X=0.50\text{m}$  では  $X=0.25\text{m}$  よりも斜めの成分が弱くなっていることが確認できる。 一方、  $X=0.75\text{m}$  を超えると斜めの成分は存在しているが、  $x$  軸方向に進む波の成分が強く表れていることが分かる。 この傾向は  $X=1.0\text{m}, 1.195\text{m}, 1.5\text{m}$  でも同様に確認できる。 またフェッチが長くなるほどスペクトルピークを示す波数  $k_x$  が低波数側に遷移していることが分かる。 同様にフェッチ  $X=1.0\text{m}$ ,  $P=50\%$  の時  $x$  方向の波長は約 7 $\text{cm}$  である。 この時対応するのは波数  $k_x = 0.9\text{cm}^{-1}$  である。 この波数でス

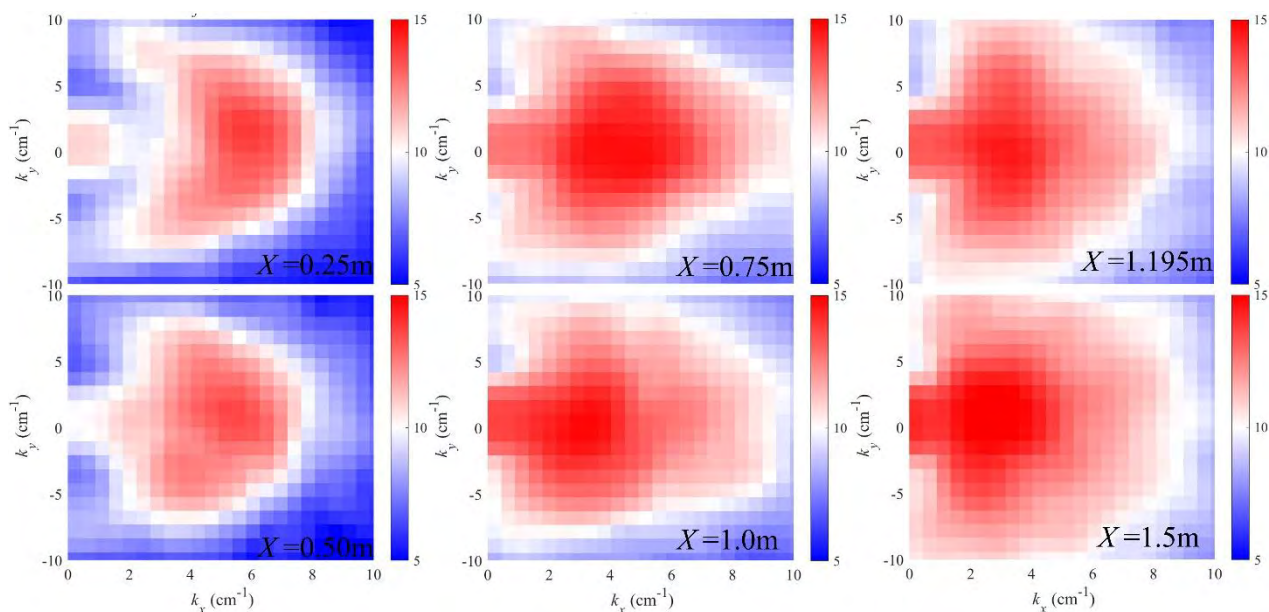


図-6  $P=50\%$ での  $f = 30\text{Hz}$  でのフェッチ  $X$  毎の時空間スペクトル (カラーバーはスペクトル強度を表す)

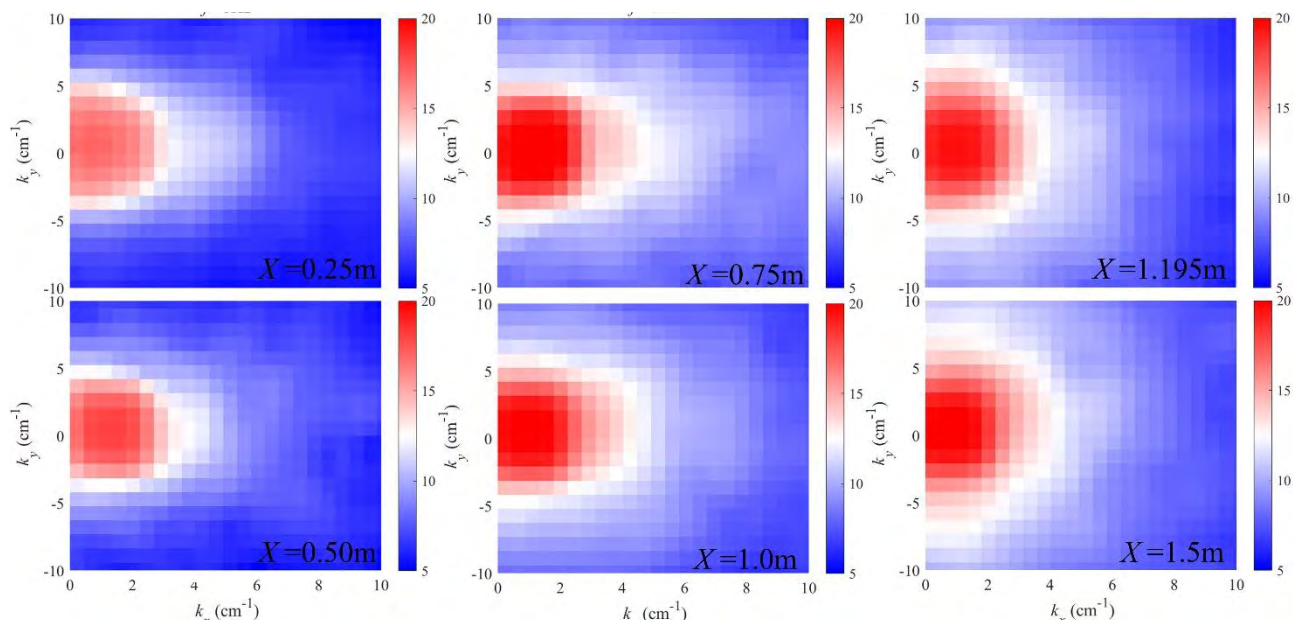


図-7  $P=50\%$ での  $f = 6\text{Hz}$  でのフェッチ  $X$  毎の時空間スペクトル (カラーバーはスペクトル強度を表す)

スペクトルピークを持つ時空間スペクトルはフェッチ  $X=1.0\text{m}$ ,  $P=50\%$ では  $f = 6\text{Hz}$  である。そこで、 $P=50\%$ のフェッチ  $X$  毎の  $f = 6\text{Hz}$  の時空間スペクトルを比較する(図-7)。フェッチ  $X$  が長いほど低周波数の波が強くなっていることが分かる。

以上のことから斜めのフェッチ  $X$  が長い地点でも斜めの指向性は残っているが、風方向に進む指向性が強いために斜めの指向性を持つ波が引き伸ばされ、相対的に風方向に進んでいくと考えられる。また波の流れにより波が3次元形状から2次元形状へ変化していると考えられるため、次節から波の流れの計測について考えていく。

## 7. PIV 計測法

前章で波が3次元から2次元に遷移する時波の流れが寄

与している可能性が示唆されたため、波の流れを計測していく。

波の流れを計測する方法としてPIV計測法が挙げられる。PIV計測を風洞水槽内の水の流れの計測に適用するにあたり、予備実験を行った(図-8)。レーザー装置からYAGレーザー(波長532nm)を照射し、ロッドレンズを通してレーザー光をシート状にする。水中に混入したトレーサ粒子がレーザー光に照らされ、水中での移動が可視化されるので、高速カメラで撮影した。

図-9はPIV計測を行った画像である。トレーサ粒子がレーザーに照らされている様子が確認できる。今後この粒子を追うプログラムを用いて、トレーサ粒子の動きから波の流れを可視化・数値化していく。

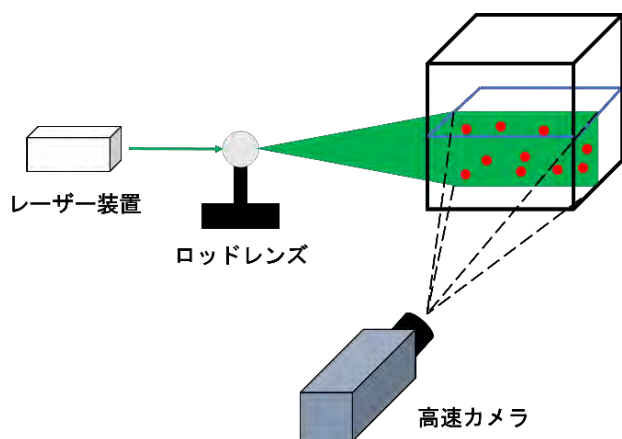


図-8 PIV計測の模式図

## 8. 結論

DLP を用いて水位の面分布を調べてきた。渡部・黒田(2022)<sup>2</sup>によるとファン出力が低い時はフェッチが短いと波に斜めに指向性が確認できたが、フェッチ  $X=1.195\text{m}, 1.50\text{m}$  では斜めの指向性から風向き方向の指向性へと波が遷移していることが確認された。  $P=50\%$  の場合では、フェッチ  $X=1.195\text{m}, 1.50\text{m}$  の両方でクレスト前面に寄生毛管波を確認できた。またファン出力  $P=75\%$  以上だと spume が確認された。

水面形を特徴化していくために短時間3次元スペクトル解析を行ってきた。  $X=0.25\text{m}$ ,  $P=50\%$  の時の斜めに進む波の  $x$  軸方向の波長を基にスペクトル解析を行うと、斜めの指向性はフェッチが長くなっても残っているが、フェッチが長くなるにつれ風向き方向の波が強くなるので、斜め方向の波は風向き方向に引き伸ばされ、相対的に斜め成分は弱くなってしまっていると考えられる。この時波の流れが原因で波が3次元形状から2次元形状へ変化していると考えられる。そこで波の流れを計測するためにPIV計測を用いていく。

今後の展望としては、風洞水槽内にPIV計測を適用し波の流れを可視化する。年次技術発表会では風洞水槽内に適用した結果と波の流れが水面形状変化に及ぼす影響について調べ、発表したい。

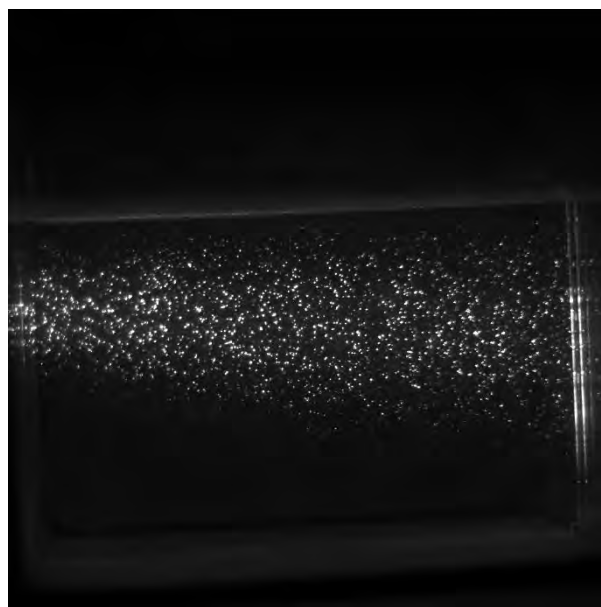


図-9 PIV計測できた原画像

## 9. 参考文献

- 1) Kawai, S. : Generation of initial wavelets by instability of a coupled shear flow and their evolution to wind waves. J. Fluid Mech , vol. 93 (1979):661-703.
- 2) 渡部 靖憲, 黒田 晴希 : 風波生成時の3次元的水面形状の発達, 土木学会論文集 B2, No78,/2, pp.49-54, 2022