

風波の三次元的な水面変化の可視化計測

Visual Measurement of Three-Dimensional Water Surfaces Caused by Wind Waves

北海道大学工学部 ○学生員 黒田晴希 (Haruki Kuroda)
北海道大学院工学研究院 正会員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

一般に複数の方向から入射する波浪の重畳として観察される三次元的な水面変化とは別に、一方方向のみから吹送され、発生した波に関わらず波峰方向に水面形変化する波浪が存在する。この場合、海洋表面における波峰方向に非一様なストークスドリフトが発生するため波の進行方向に軸を持つ循環流、いわゆる Langmuir Circulation(LC)が発生することが知られている。

(S.A.Thorpe 2004) ¹⁾LCは海面とバルク水を混合する役割を持ち、大気-海洋間の根湯や気体の輸送だけでなく、海洋生物への栄養分など物資の混合を通じた海洋生態系の維持に貢献する。一方、風の吹送初期に観察される風波の形状もまた三次元的な分布を持ち、フェッチの増加と共に一様な波峰を持つ二次元的な水面を持つ波浪へと遷移することが知られている。即ち、風波初期波の生成において水面を挟む風境界層並びに海洋境界層中に LC に類似した循環流が誘発され、これが風波発生機構に関係している可能性がある。

一方海洋研究において一般的であった波高計による点計測では詳細な面的な水面変化を評価するのは困難である。Wright, W. B. and Budakian, R. and Putterman, S. J.(1996)²⁾は動的に三次元水面変化を可視化する Diffusing Light Photography(DLP)を提案し、渡部・小嶋(2020)³⁾は Faraday 波の集中波群計測に適用している。

本研究は DLP によって風波初期の三次元水面変化を特徴化し、風波生成への寄与を見積もることを最終目標とするものである。本項では、DLP の精度の検証を通して、風波計測への適用性を検討する。

2. 風洞水槽について

風波の計測に当たって、風洞水槽を用いて実験を行っていく。風洞水槽とは送風機と水槽が一体となった装置のことであり、送風機から送られた風が水槽に入っている水面上を通過した後、また送風機に戻るという循環が可能な装置である。(図-1) この風洞水槽で一様な風を発生させ、波面の横断方向の流れを調べていく。

3. 実験方法

風洞水槽(3章で説明する)で一様な風を発生させ、非一様な波面を観測するにあたって、観測の精度を確認する予備実験を行った。

本実験では縦、横、高さ全て 19cm の透明の水槽の液体中に白色微粉末を投入し、水槽の底面から照射される光の散乱による光強度の変化から水位を求める DLP により、輝度を用いて水位を求めていく。

図-2 のように鏡を用いて、LED 光源から発される光

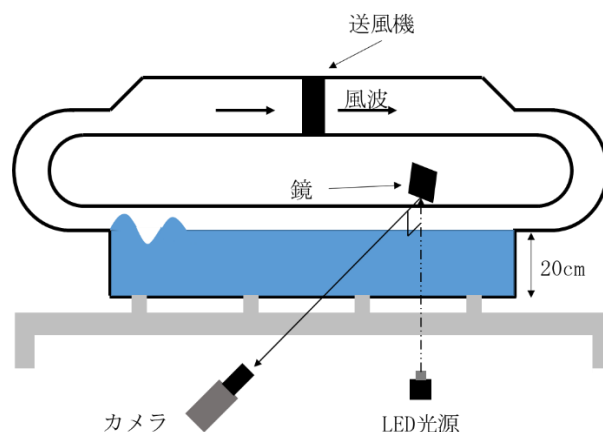


図-1 風洞水槽の概略図

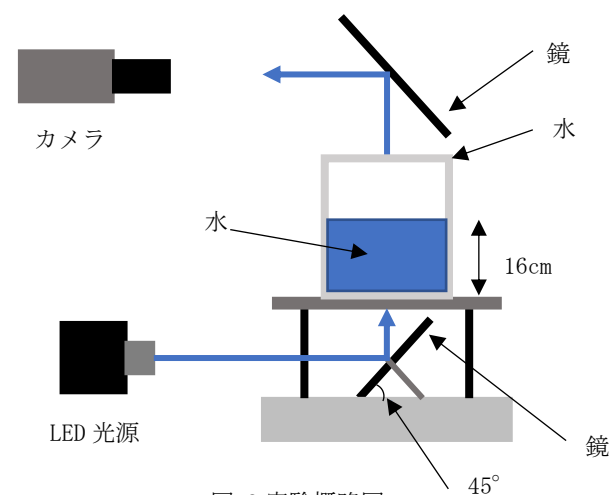


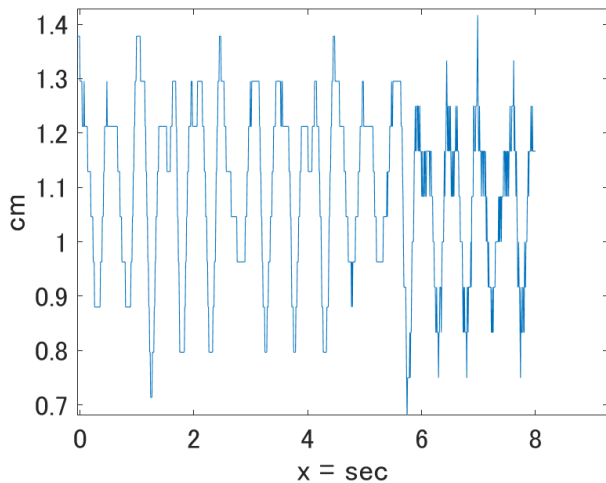
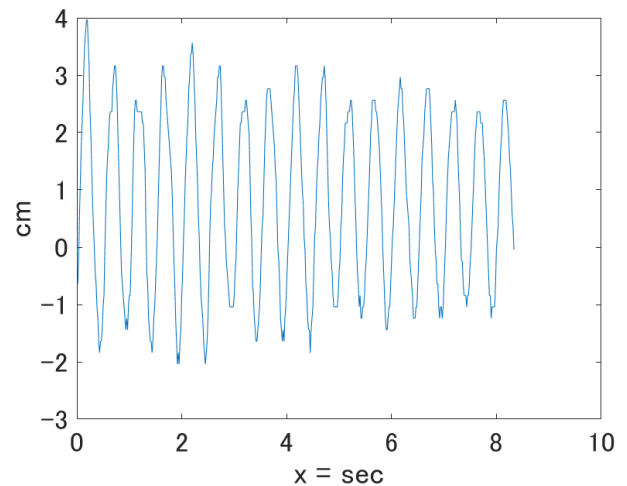
図-2 実験概略図

を水槽底面に照射し、水槽上部に設置された鏡を介して高速カメラ(解像度 1024×1024)で撮影する。キャリブレーションを行うにあたってまず水深を 14cm から 18cm まで 1cm 間隔で変化させ、計 5 回撮影する。撮影された画像濃度によって各ピクセルにおける更正直線を求めることで水位の面分布を求めることができる。

実験に適した白色粉末濃度、撮影速度を調べるために、それぞれを $6.9 \times 10^{-4} \text{g/cm}^3$ 125fps, $1.1 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ 60fps, $2.7 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ 60fps (水槽 1cm ごとにそれぞれ 0.25g, 0.40g, 1.0g) の 3 つで、水槽を水平な状態から傾けて手を離れた時の水深の変化の様子で比較する。

DLP により水面の変化の面分布を計測できるか調べるために、直径 4cm の球を水面に接した状態で水槽の中心付近から水中に落下させる。

その後、水深を 16cm とし、水槽を水平な状態から、1cm だけ傾けて戻した時の水面の変化を DLP により計

図-3 $6.9 \times 10^{-4} \text{g/cm}^3$ 125fps で撮影した場合図-4 $2.7 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ 60fps で撮影した場合

測する。

DLP により観測される水面の変化の妥当性を調べるために、水深を 16cm とし、波高計を基準の位置、その位置から $\pm 3\text{cm}$ の位置での計 3 回計測し、キャリブレーションを行い、その後、波高計を用いて同様に水槽を水平な状態から、1.5cm だけ傾けて戻した時の水面の変化を計測する。

風洞水槽内の風速分布を調べるために、風が送られてくる高さが底面となるように、板を風洞水槽内に立て、板と風洞水槽の間に空間が全くできないように EPE（発泡ポリエチレン）を詰める。そして簡易風速計を底面から 1cm 毎に高さを変えて風速を測る。この時風洞水槽の曲線部分を通過することにより、風速分布が理論値と異なることが予想されるため、曲線部分を通過することによる影響を少なくするために、風との抵抗を成す簡易的な芝を曲線部分が終わった直後の位置に置いた場合と芝を置かない場合の 2 パターンを計測する。

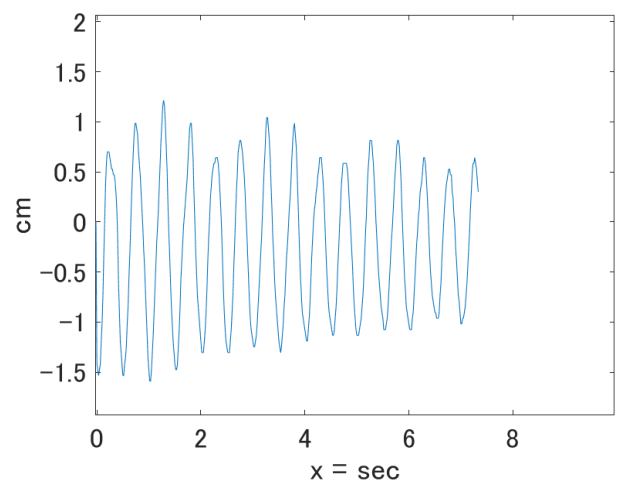
4. 実験結果

$6.9 \times 10^{-4} \text{g/cm}^3$ 125fps で撮影した場合（図-3）は水深の変化が階段状で滑らかになっていない。 $2.7 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ 60fps で撮影した場合（図-4）は波形の頂点付近が滑らかではなく、鋸歯状になってしまっている。一方、 $6.9 \times 10^{-4} \text{g/cm}^3$ 125fps で撮影した場合（図-5）は頂点付近でも滑らかな曲線を描いている。よって $1.1 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ 60fps、が DLP を行うのに適した白色粉末濃度、撮影速度であると考えられる。

水中に球を落とした時に落とした場所付近を中心に水位が滑らかに変化しているのが見て取れる。（図-6）局所的に誤差が大きい所はカメラにゴミがついていたためである、この結果より、DLP が水面の三次元的変化を計測するのに妥当であると考えられる。しかし、球を落としてから水面の揺れがなくなるまで経過しても、水深の位置が 0cm になっていない。

そこで、DLP によって求められる更正直線を用いて求められる水深と実際の水深との差を 14cm から 18cm までの 5 つの二乗平均平方根として求め、面分布に表した。

（図-7）四隅を除いて全体的に約 1.5mm の誤差が出てしまっていることが分かる。四隅で誤差が多く出てしまっ

図-5 $1.1 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ 60fps で撮影した場合

ている原因は LED 光源からは円上に光が照射されるため、四隅には光があまり届いていないためである。

水槽を 1.5cm 傾けた時の水深の変化について、DLP では面的水面変化を観察することができるが、ここでは波高計での実験と比較するために、波高計を設置した場所の 1 点の水深の変化に着目した。波高計を用いた時の水深の変化と DLP との比較を行ったのが図-8 である。波高計と DLP とでは周期にほとんど差異は見られないが、それぞれで計測される水深に大きい所では 1cm の誤差が生じてしまっている点も存在する。

水槽を傾けた時の固有周期の理論値は

$$T_n = \frac{2\pi}{\sqrt{gk_n \tanh k_n h}} \quad k_n = \frac{n\pi}{a} (n = 1, 2, \dots)$$

a: 水槽の幅 h: 水深

で求められる。今回の振動は $n = 1$ の場合で、水槽幅 19cm、水深 16cm なので、理論値は $T = 0.496$ 秒である。図-7 から振幅の 1 周期を求め、5 つを平均したところ、 $T = 0.504$ 秒であった。このことから、波高系の周波数は約 2Hz であることが分かる。この結果より、DLP は水深の変化について、時間変化を観測するのに妥当だと分かる。

風速は理論的には通過する管の中心で最も速くなり、

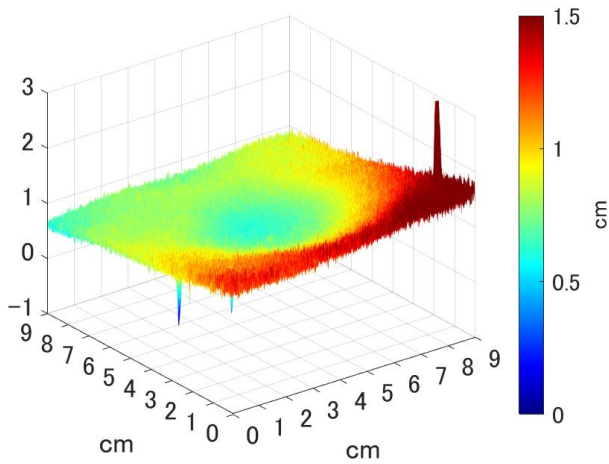


図-6 球を水面に落とした時の水面の面分布

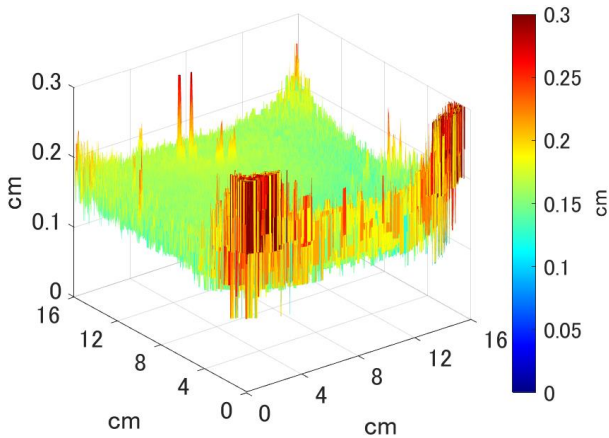


図-7 誤差の二乗平均平方根の面分布

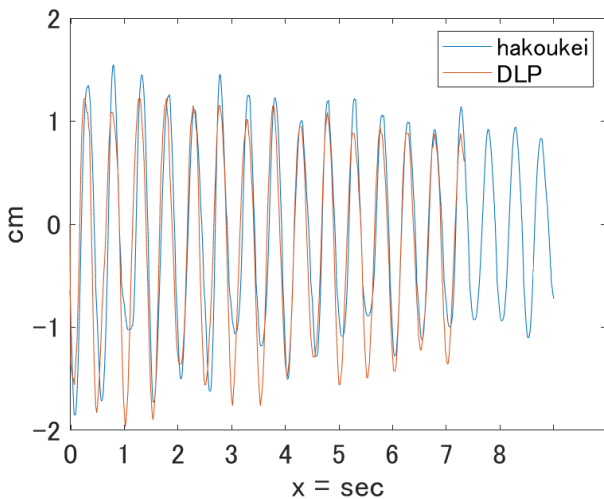
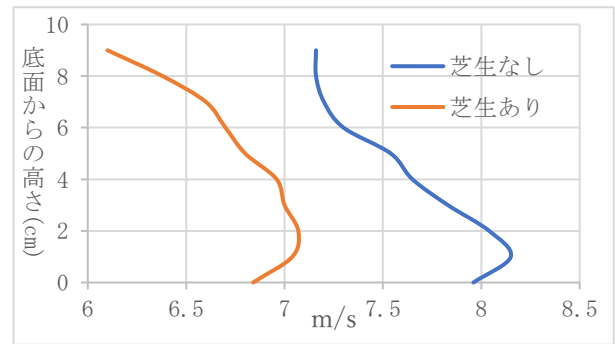


図-8 DLP と波高計の比較

中心から離れるほど遅くなり、その分布は放物線を描く今回の計測ではあらかじめ予想されていた通り、芝生を置いた場合の方がおかない場合よりも風速の分布は放物線に近い分布をしている。しかし、風の通っている管中心よりも底面に近い所で最大風速をむかえている。



5. まとめ

DLPを用いて風波計測へ適用していきたいので、DLPの精度を確認する実験を行ってきた。DLPで計測を行うと面全体に僅かな誤差が生じてしまい、波高計と比較しても水深に誤差が生じてしまっている。今後はDLPと波高計との比較を重ね、水深が一致しない理由を考えていく必要がある。また風速が管の中心で最大とならない理由についてもこれから簡易的ではない、より正確に測ることができる風速計を用いて観測を重ね解決していく必要がある。DLPでの計測の精度の確かさが得られたら、DLPを風波計測に適用していきたいと考えている。

参考文献

- 1) S.A. Thorpe(2004): Langmuir Circulation. walls. Annu.Rev. Fluid Mech., 36, 55-79
- 2) Wright, W. B. and Budakian, R. and Putterman, S. J.(1996):Diffusing light photography of fully developed isotropic ripple turbulence. Physical review letters, 76(24), 4528.
- 3) 渡部 靖憲, 小嶋 亮太: Faraday 波動場における波浪集中と崩壊過程、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、76 巻 2 号、pp.13-18、2020