

渦-波相互作用に関する実験的研究

Experimental study of vortex-wave interaction

北海道大学工学部 4年 ○学生会員 飯山侑 (Yu Iiyama)
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

異なる側面の現象である渦と波は複雑な流れを特徴づけ、説明するために別々に用いられてきた歴史がある。例えば、いまだその本質が解明されたとはいえない乱流について、渦の分裂を経た小渦化(リチャードソンカスケード)に対して波動性を前提としたエネルギースペクトルのカスケード(Kdmogolve 1941⁽¹⁾)の理論解は独立して存在する。一方、海洋波浪場と海洋流の渦場、例えば渦潮や海流蛇行による海洋渦などは同時に存在し得るが、解析的に両者は相いれない。すなわち、渦無ポテンシャル流れが前提となる波動論にとって渦場の存在はその理論体系自体を破綻させる。

一方、天文学分野ではブラックホール周辺の重力波の散乱が流体中の渦による水面波の散乱と類似するとされ、いくつかの実験的研究が行われてきた(Vivanco et al. 2004⁽²⁾)。海洋波浪においても同様な散乱が発生するのであれば、波向きの分布は渦場に依存するため、推進変化での波向きが変動する現行の波浪推算モデルのバイアスの主因となっている可能性がある。

本研究は既存の理論体系の相違から現存まで殆んど考えてこなかった渦-波共存場を実験的に形成し、その相互作用の解明を経て将来的な波浪推算モデルの高度化を目指すものである。

2. 実験方法

渦-波共存場における相互作用の存在を確認するため、渦核との距離による波形の変化の観測と、水面にフリンジを投影し、水面変動によるフリンジの位相変化を観測する実験を行った。

2.1 渦との距離による波形の変化

実験装置として水槽(全長 150cm 高さ 10cm 幅 90cm)、容量式波高計、造波機として加振器(0-8kHz)、マグネットスターラー(0/100-3000rpm)を用いた(図-1)。ここで加振器を用いているのは、通常の造波機より高い周期の波を発生させることで波のスケールと渦のスケールを合わせ、渦と波の相互作用を観測しやすくするためである。

加振器の周波数 5Hz、マグネットスターラーの回転数 990rpm に設定し、水深 8.5cm で渦を発生させた。渦が安定したら波の進行方向に対して垂直に渦核からの距離が±3cm、±5cm、±8cm の地点での波形をサンプリング周波数 400Hz で 5 秒間計測開始すると同時に加振器を作動させた。また、渦がない場合の波形も同様の設定、手法で計測した。なお、測定地点の正負の方向は図-1 に示す通りである。

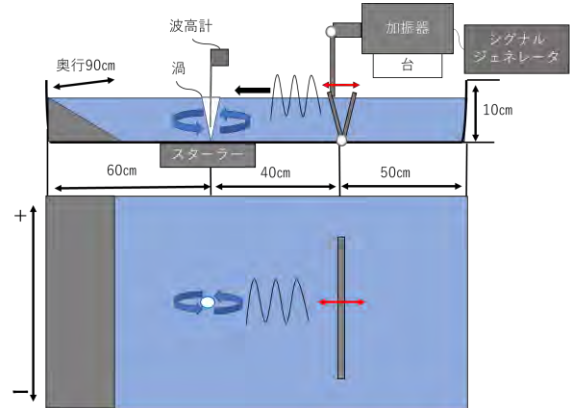


図-1 容量式波高計による観測装置

2.2 フリンジによる水面変動の観測

先述の波高計を用いた観測では、離散的なデータしか得られず、また波高計を水中に挿入することによる流れの変化も起こり得る。水面変動を面的に観測するために、Pablo et al.2009⁽³⁾に示されたフリンジを利用した光学的形状測定法を用いた。この方法はプロジェクターを用いてフリンジを投影し、対象物の凹凸によって投影されるフリンジの位相が変化することを利用して、その様子をカメラを用いて撮影し、対象物の高さ形状を求める手法である。

実験装置は図-1 の波高計を取り外し、カメラとプロジェクターを水平に取り付けた(図-2)。プロジェクターの高さは水面から 22cm、フリンジの幅は 3mm とした。水面にプロジェクターを用いてフリンジを投影するため、微粉末を投入し水を白濁させた。

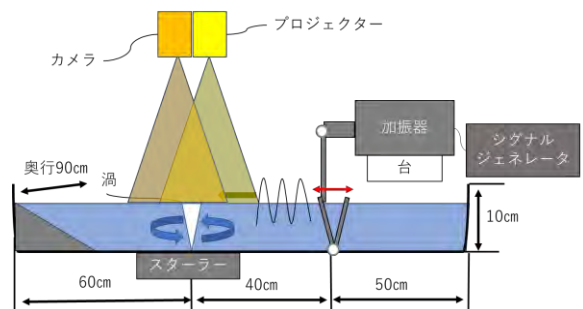


図-2 フリンジを用いた観測装置

水面形状を測定する前段階として、白色の液体で満たしたペットボトルを白地の地面に置いて撮影を行った(図-3)。表面の凹凸によってフリンジの位相が変化し、ペットボトルの形状が浮き出ていることがわかる。

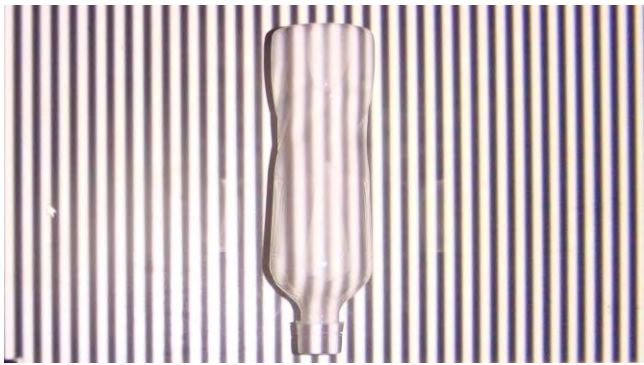


図-3 フリンジによる観測の例

3. 実験結果

3.1 渦との距離による波形の変化

渦による流れの方向が波の進行方向と一致する側(図-4(a))と、逆方向になる側(図-4(b))で渦核からの距離ごとの波形をプロットした。

図-4(a)では渦核に近いほど振幅が小さくなり、図-4(b)では渦核に近いほど振幅が大きくなった。また、図-4(b)では渦核に近い+3cm 地点では渦がない場合に比べておよそ 30 倍の振幅と極端な変化が見られた。そして、両者ともに渦核から 8cm 離れた地点では渦がない場合の波形とあまり変わらない結果となった。このように、波の進行方向に対して渦の左右で波形に違いが現れた。

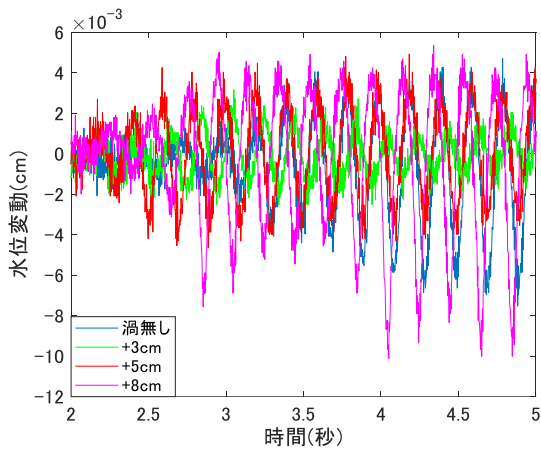


図-4(a) +側の波高変化

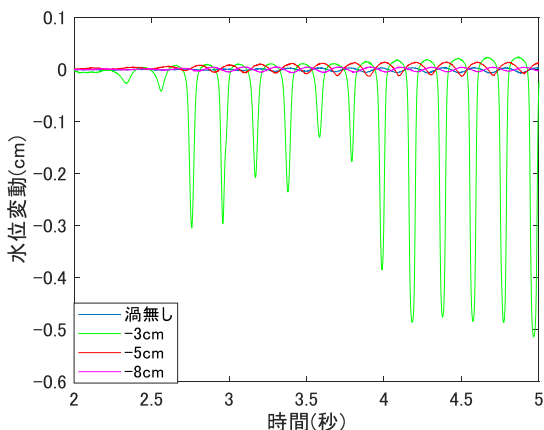


図-4(b) -側の波高変化

3.2 フリンジによる水面変動の観測

3.1 の実験と同様にスターラーを 990rpm で動作させ、5Hz の波を発生させた水面にフリンジを投影し、撮影を行った(図-5)。なお、図-5 は動画で撮影したものを抜粋した画像であり、紙面向かって右から左に波は進行しており、三枚の写真は左から順に 0.2 秒間隔の画像である。この画像から、時間経過に伴う渦や波による水面の変動によってフリンジの位相が変化していることがわかる。



図-5 フリンジによる水面変動の観測

このフリンジの位相変化から水面の高さ方向の変位を求めることができ、観測範囲の面的な変動を導き出すことができる。今回の実験では撮影まで行ったため、今後これらの映像データを解析してゆく。

4. まとめ

本研究では渦-波共存場を実験的に形成し、その相互作用の解明のため、はじめに渦との距離ごとに波高を測定し、波形の変化を調査した。その結果、渦との距離に応じて波形が変化した。また、その変化は渦の左右で違いが現れた。さらに面的な水面変動を調べるため、Pablo et al.(2009)に示されたフリンジを利用した光学的形状測定法を用いたところ、水面変動によるフリンジの位相変化が確認できた。今後はこのフリンジの位相変化をもとに渦と波の相互作用による水面変動の解析を行い、さらに渦度や波の周波数の変化による応答も調査していきたいと考えている。

5. 参考文献

- 1) Kolmogorov, A.N.: The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. Cr Acad. Sci. URSS, 30, 301-305, 1941.
- 2) Vivanco, F., & Melo, F.: Experimental study of surface waves scattering by a single vortex and a vortex dipole. Physical Review E, 69(2), 026307, 2004.
- 3) Cobelli, P. J., Maurel, A., Pagneux, V., & Petitjeans, P.: Global measurement of water waves by Fourier transform profilometry. Experiments in fluids, 46(6), 1037-1047, 2009.
- 4) Takeda, M., & Mutoh, K.: Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. Applied optics, 22(24), 3977-3982, 1983.