

屈折波面の線計測

Line Measurement on the Surface of the Refracted Waves

北海道大学工学部 ○学生員 中山 隆仁 (Ryuto Nakayama)
北海道大学大学院工学研究院 正会員 猿渡亜由未 (Ayumi Saruwatari)

1. はじめに

近年世界的に再生可能エネルギーへの関心が高まっているが、特にパリ協定が発効して以降は各国で再生可能エネルギーの将来の利用率に関する数値目標が掲げられるなど、自然エネルギーの利用拡大に向けた議論がますます活発になってきている。従来自然エネルギーと言えば太陽光や陸上風力、地熱などが代表的なものとして利用されてきたが、海洋に於いても波浪、海流、潮流、洋上風力など豊富な自然エネルギーが賦存しており、今後積極的な活用が望まれるところである。例えば古くから海洋再生可能エネルギー研究が活発に行われてきた英国では 2020 年までに波浪、流れエネルギー発電の本格的な商用利用が開始できる見込みであることが発表されており、また中国では 2017 年に発表された第 13 次 5 年計画において 2020 年までに合計 50 MW 規模の海洋エネルギー発電事業を展開することが宣言されている¹⁾。日本でも 2016 年に岩手県でフラップ型波力発電装置を有する久慈波力発電所 (43 kW) からの送電グリッドへの電力供給が開始、また 2015 年に山形県酒田港で振動水柱型波力発電装置 (15 kW) の実証試験が実施されるなど、この数年で海洋エネルギーの利用が促進されている。

波力発電装置には、例えば前述のフラップ型や振動水柱型を始めとし、越波型、ブイ型などがあり、沿岸設置を想定した護岸固定タイプや外洋設置を想定した浮体タイプ、没水タイプなど、様々な機構の装置が提案されている (図-1 参照)。発電装置の形状や機構に依存して発電効率や暴波浪へのロバスト性、メンテナンス性などに異なる特徴を有しているが、越波型の装置は越波水塊をリザーバに貯水し波浪エネルギーを一旦位置エネルギーに変換する為、発電出力を比較的稳定させることができると言われている。Liu et al.³⁾ は浮体タイプの越波型波力発電装置である Circular Ramp Overtopping Wave Energy Converter (CROWN) を提案し、その性能、波浪吸収率などについて検討を行っている。CROWN はリザーバを取り囲むように設けられたスロープの効果により入射波を屈折、変形させ、効率的に波エネルギーをリザーバに集中させることが可能となる。このような円錐形のスロープを通過する波浪の屈折、変形については古くから circular island 問題として理論的な研究が行われてきたが²⁾、屈折波同士が干渉する円錐背後では、波向線が交差してしまい理論解が導出できない領域が発生し得る。

本研究の最終的なゴールは、越波型浮体波力発電装置周辺における波浪変形の特徴を明らかにすることである。本論文では装置周辺のスロープ上で屈折する波浪の水面を水理実験において線計測する為の手法を確立することを目的とする。多くの場合波浪水面は波高計を用いて測定されるが、本方法では波面形状を画像計測することにより、平面

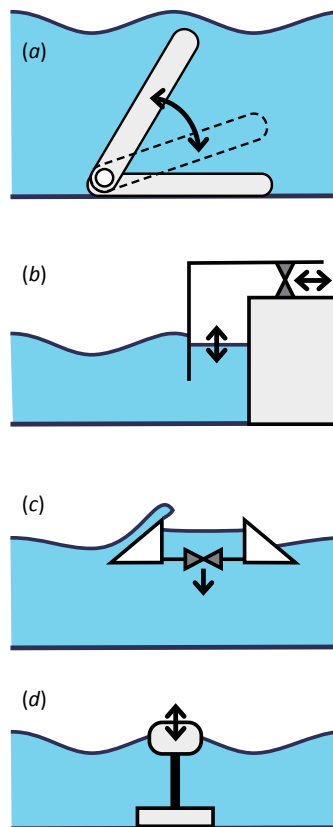


図-1 典型的な波力発電装置の例。(a) フラップ型, (b) 振動水柱型, (c) 越波型 (d) ブイ型。

的な波浪の屈折現象を詳細且つ効率的に、非接触で測定することが可能となる。

2. 実験方法

2.1. 実験装置

本研究は、レーザー誘起蛍光法を利用し、レーザーライトシート (LLS) を用いて水面を可視化する方法によって、水と空気の境界点 (気液境界) を正確に捉えることを目的としている。気液境界位置を知ることによって、容量式波高計や超音波式波高計では得ることのできなかった測線上での水位計測が可能となる。本実験は片側に造波板が設置された全長 125 cm、幅 93 cm、深さ 20 cm 水槽内で行われた (図-2)。水槽底面から 70 cm 高さにレーザー出力機を設置した。シリンドリカルレンズを通すことによってシート状にされたレーザー光を、レーザーミラーを介して水面上方から鉛直下方に照射した。実験水槽内には 130 mg/L の濃度のウラン (フルオルセインナトリウム、吸収極大波長 494 nm、

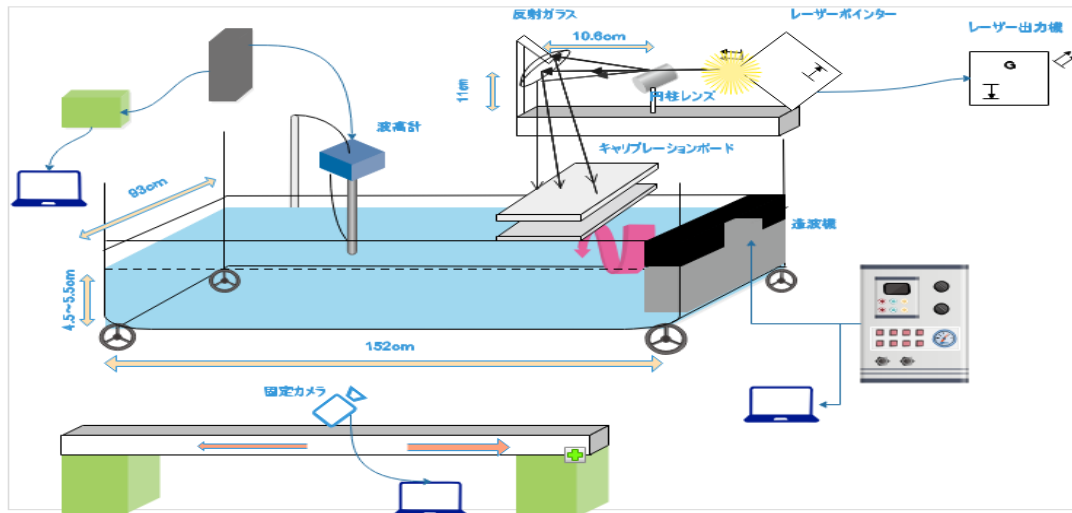


図- 2 実験装置.

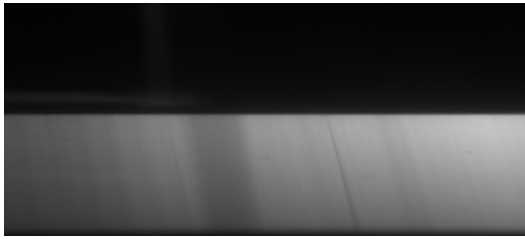


図- 3 典型的な撮影画像.

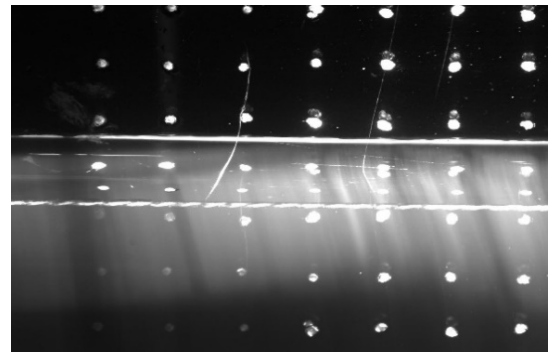


図- 4 キャリブレーションボード撮影画像の例.

蛍光極大波長 521 nm) 水溶液が水深 4.9 cm ではられている. レーザーシート面で励起発光するウラン溶液を, 水槽側面に設置されたカメラ (解像度 1280×1024 pixel 撮影周波数最大 60 Hz) によって波向き方向に対して側面から撮影し、波面を測定する. ここで波向き方向を x 軸, スパン方向を y 軸, 鉛直上方を z 軸とし, 造波板前面を $x=0$ と定義する. レンズにはピーク透過波長 400 nm–499 nm の光学フィルタを装着したのに加え, 水槽周囲を暗幕で囲うことにより溶液からの蛍光以外の光の入射を制限している. 図-3 は取り込んだ画像の例である.

また画面上での実長を検定するためにキャリブレーションポイントが 5 mm 間隔で記されたキャリブレーションボードをレーザーシート面上に立て, 実験前に静水状態で撮影する. 図-4 は撮影されたキャリブレーション画像の一例である. 実験時は水面上のキャリブレーションポイントをできるだけ多く読み取り画像座標から実座標への変換関数を求めた. 図-5 にキャリブレーションボードから読み取った点を赤で示している. ここでは簡易的に赤点下段の左端を $(x', z') = (0, 0)$ としている. 打ち込んだ値は背後のキャリブレーションボードの点とほぼ一致している.

2.2. 水面の検出

空気を水の境界は図-?? からも輝度の勾配が最も大きくなることからわかる. 本研究では輝度の 1 階空間微分の絶対

値のピーク位置が水面を表すと仮定し水面測定を行った. ピーク位置は輝度微分地の鉛直方向の分布に対し, 次式で表される. 正規分布曲線をフィッティングさせたときの μ の座標とした (図-6下参照).

$$I_{xy} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp \left[-\frac{(z - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1)$$

ただし, 本方法では輝度微分地のピークが正確に水面を表すという保証はない. 図-3項に周期 0.3 (s), 振幅 5 の条件で実験を行ったケースにおいて本方法により検出された水面を撮影画像上にプロットしたものを示すが概ねの水面形状は検出できているものと考え.

3. 実験結果

造波機を利用し、水槽内に周期 0.1 s–2 s, 振幅約 5 mm–10 mm の波を起こし、同様にデジタルビデオカメラによる撮影を行う. 実験は波高計を 2 台, レーザーシートの左右から挟み込むように設置し (ビデオカメラ手前を 1, 奥側を 2 とする), レーザーシート付近での波高を録画スタートと同時に測定する. 波高計 1, 2 とビデオカメラによる波

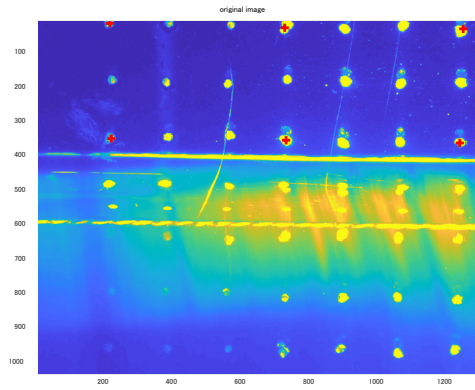


図-5 キャリブレーションボード上にプロットされたキャリブレーションポイント。

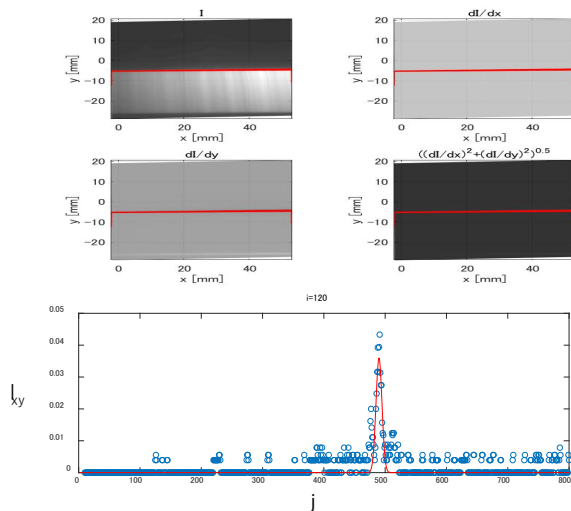


図-6 (上) 撮影画像上にプロットされた検出水面 (赤線)。(下) ある x 座標における輝度勾配 I_{xy} の鉛直方向分布 (青) と式 (1) によるフィッティング曲線 (赤)。

高変動が重なるかどうかを確認する。

3種類の異なる波形を生成し、それらを水槽内に入射させたときの波高変動について調べた。図-7は波高計1 (赤)、波高計2 (青)、カメラによる撮影画像 (黒) により測定した水位変化の時系列を比較したものである。水位変動測定のうちクレスト通過時の測定値はいずれの結果でもおおむね一致しているのに対し、トラフ通過時の測定値は波高計1がどのケースにおいても、他の結果から逸脱しているのがわかる。画像測定の誤差に加え、本実験では波高数 mm 程度の規模の水位変化を測定対象としていることから波高計の乾燥状態や水に対する吸収率の違いなどが影響している可能性があると考えられる。同じ条件下で波高計のみを交換し計測するなどして、今後検証する。また周期、振幅が大きいほど3つのグラフがより正確に一致していることがわかる。電圧による測定により、大きく変化する波形ほど正確に計測が可能であることがわかった。水位変動の定量的な値については検討の余地があるものの、波面変動の基

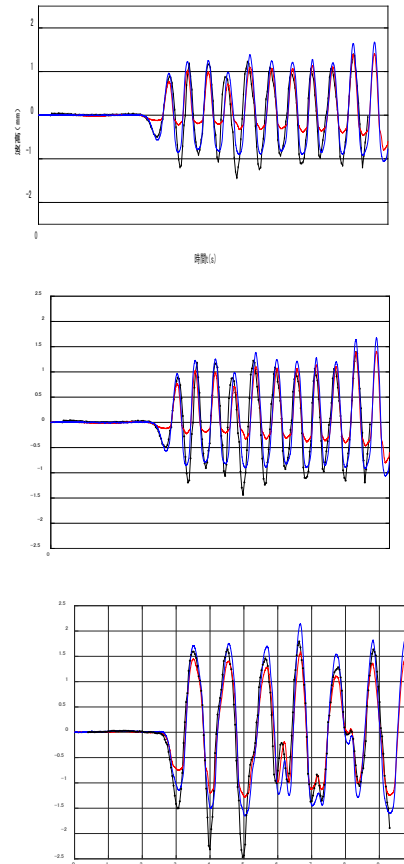


図-7 波高計1 (赤)、波高計2 (青)、カメラによる撮影画像 (黒) により測定した水位変化の時系列。

表-1 造波条件。

Case#	1	2	3
周期 T [s]	0.3	1.0	1.0
振幅 [mm]	5	10	15

本的な特徴については概ね本画像計測法により把握することが可能であることが確認された。

本研究の実験条件および測定地点では、造波開始から4波目くらいまでは造波板側から入射する進行波のみを測定できているものの、それ以降の位相では造波板反対側の壁面で反射した波の影響により重複波が形成されることが確認された。よって本実験では反射波の影響のない造波直後の波のみを計測対象としていく。

図-8は撮影画像から線計測された水位変動の時間変化を表したものである。前述の波高計との比較で考察した様に水位の定量化については今後検討の余地があるものの、本解析によりほぼ欠測なくレーザーシート面における水位変動を線計測することができた。本方法を用いることにより底面条件の変化に依存した波浪の屈折回折現象の特徴を調査することが可能であると考えられる。

4. 結論

本研究ではレーザー誘起蛍光法を利用し、水と空気の境界点 (気液境界) を正確に捉え、気液境界位置を知ること

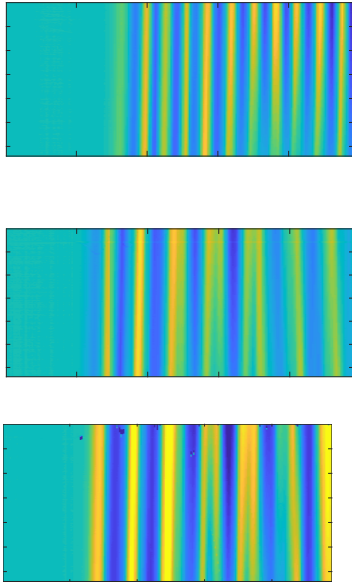


図- 8 線計測された波面変動の時間変化.

で、レーザーシート面上での波高計測を可能とし、波形を計測し、その正確性を調査した。本研究の実験条件では完璧に一致させるに至らなかったが装置による影響を知り、改善点を発見することができた。今後は、水槽の終端に波の吸収材を設置し後退波を削減するとともに、波高計による電圧の影響を定量的に調べていき、さらに最良な波の周期、振幅条件を明らかにしていくことが求められる。

参考文献

- 1) Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. *Renewables 2017 Global status report*. 2017.
- 2) Philip L. F. Liu, Yong-Sik Cho, Michael J. Briggs, Utku Kanoglu, and Costas Emmanuel Synolakis. Runup of solitary waves on a circular island. *J. Fluid Mech.*, Vol. 302, pp. 259–285, 1995.
- 3) Zhen Liu, Hongda Shi, Ying Cui, and Kilwon Kim. Experimental study on overtopping performance of a circular ramp wave energy converter. *Renewable Energy*, Vol. 104, No. Supplement C, pp. 163 – 176, 2017.