

水面の表面張力波による光の回折

導入

液体の表面における波の形成と伝搬は、重要でよく知られた現象である。そのような波に関して、振動している液体に働く復元力には、重力によるものと、表面張力によるものがある。臨界波長 λ_c より十分短い波長について、重力の影響は無視でき、表面張力効果だけを考慮すればよい ($\lambda_c = 2\pi \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}}$, σ は表面張力, ρ は液体の密度, g は重力加速度である)。

この問題では、 λ_c より短い波長の表面張力波を調べる。表面張力のために、液体の表面は引っ張られた膜のようにふるまう。液体の表面をかき乱すと、波紋が広がる。ここでは、電氣的に駆動された振動子により、水面波を発生させる。レーザー光がこの表面波に入射すると、波は反射型回折格子の働きをし、明瞭な回折パターンが生じる。

表面張力波は伝搬とともに振幅が徐々に減衰する。この減衰は、液体の粘性（隣り合う液体の層の間にはたらく摩擦に相当）に由来する。

実験目的

水の表面張力波による回折を利用して、水の表面張力と粘性係数を決定する。

装置のリスト

	[1]	光度計 (光センサーに接続されている)
	[2]	ノギスに取り付けられた光センサー。スクリーンの位置に置かれる。
	[3]	タブレット (正弦波の発生に使う)
	[4]	デジタルマルチメーター
	[5]	振動子コントロール BOX
	[6]	木製の台
	[7]	光センサーを動かすガイドレール
	[8]	直流安定化電源装置
	[9]	六角レンチ, 巻尺, 定規

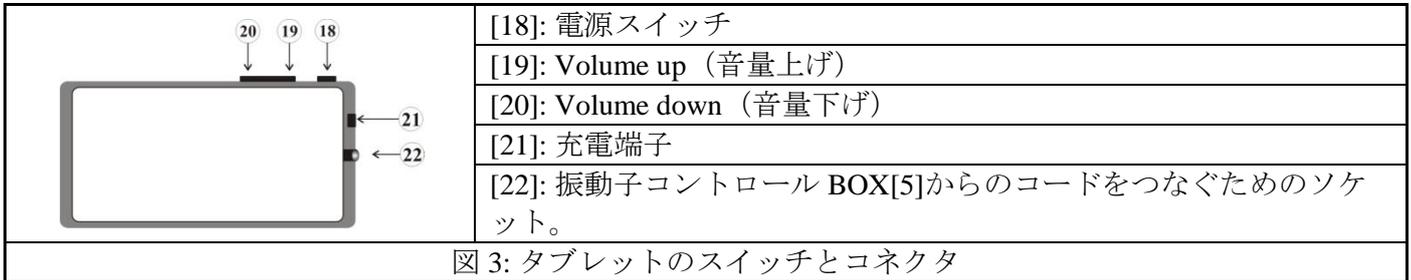
図 1: 木製台にセットした装置

	[10]	物差しと振動子の位置を示すマーカー
	[11]	振動片の付いた振動子
	[12]	水を入れるトレイ
	[13]	透明なビニールカバー
	[14]	振動子の高さを調節するための装置
	[15]	レーザー光源 2 (波長 $\lambda_L = 635 \text{ nm}$, $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)
	[16]	実験用の水
[17]	500 ml メスシリンダー	

図 2: 振動子/レーザー光源装置

装置の説明

a) 正弦波発生用タブレット



- 注意
- タブレットは充電しながら使わない。
 - 初期画面を表示するためには、電源スイッチを静かに一度押さない。
 - “Volume up” ボタン[19]を使い、出力音量を最大に保ちなさい。



図 4: タブレットの初期画面

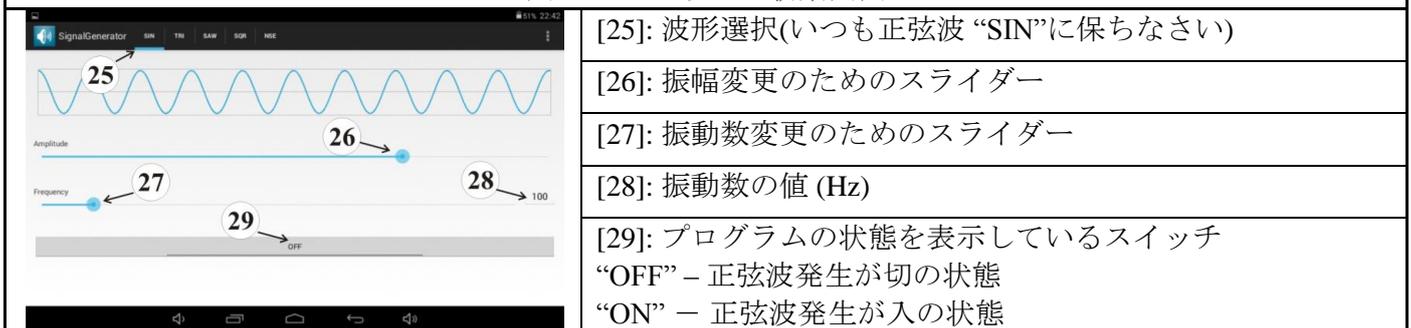


図 5: 正弦波発生ソフト

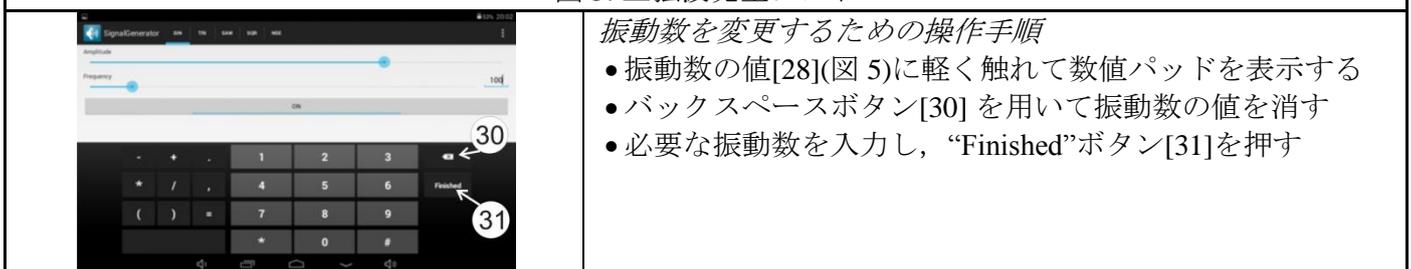
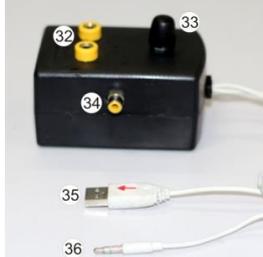
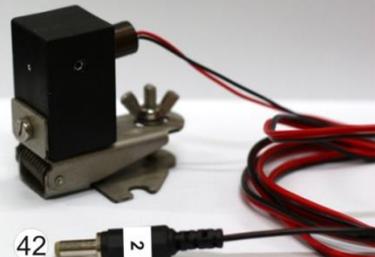


図 6: 振動数の数値を入力するために数字パッドを開いた画面

振幅を変更するための操作手順

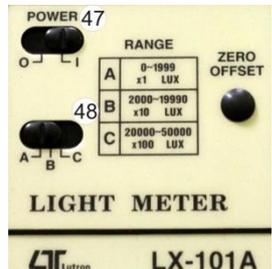
- 出力振幅を変更するためには、タブレットの振幅変更スライダー[26]を使うか、振動子コントロール BOX[5]にあるボリュームつまみ [33] を用いる

b) 振動子コントロール box, デジタルマルチメーター, 直流安定化電源, その他の接続部品

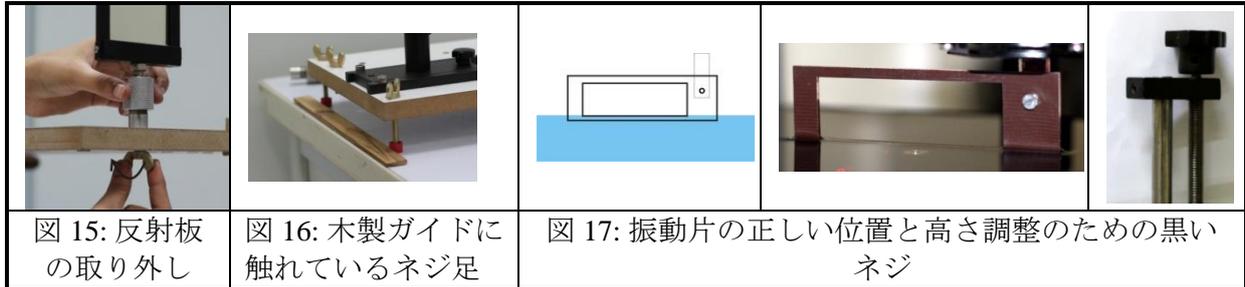
		
<p>[32]: マルチメーターからのケーブルをつなぐソケット</p>	<p>[37]: 振動片</p>	<p>図 10: コネクタ[42]のケーブルの付いたレーザー光源 2 [15](金属金具に取り付けてある)</p>
<p>[33]: サイン波の振幅を変更するためのつまみ</p>	<p>[38]: 振動子からのケーブルのピンプラグ</p>	
<p>[34]: 振動子からのケーブルをつなぐためのソケット</p>	<p>図 8: 振動子[11]</p>	
<p>[35]: 直流安定化電源につなぐための USB プラグ</p>		<p>[39]: 交流/直流切り替えスイッチ</p>
<p>[36]: タブレットにつなぐためのオーディオピンプラグ</p>	<p>[40]: レンジ切り替えつまみ</p>	<p>[43]: 強さ切り替えスイッチ (“High”の位置に保て)</p>
<p>[36]: タブレットにつなぐためのオーディオピンプラグ</p>	<p>[41]: 入力ソケット</p>	<p>[44]: 振動子コントロール BOX をつなぐための USB ソケット。</p>
<p>図 7: 振動子コントロール BOX[5]</p>	<p>図 9: デジタルマルチメーター[4]</p>	<p>図 11: 直流安定化電源[8]</p>

			
<p>[36]→[22]</p>	<p>[38]→[34]</p>	<p>[41]↔[32]</p>	<p>[35]→[44] と [42]→[45]</p>
<p>図 12: タブレット, 振動子コントロール BOX, 直流安定化電源間の接続</p>			

c) 光センサーと光度計

			
<p>[46]: 光センサーの円形受光部 [47]: 光度計の電源スイッチ [48]: A,B,C – 受光感度レンジ切り替えスイッチ</p>	<p>図 13: 光センサーの組み立てと光度計</p>	<p>ノギスの固定部は光センサーの後ろに差し込む</p>	<p>ネジを締めるときは六角レンチを使いなさい</p>
<p>図 13: 光センサーの組み立てと光度計</p>		<p>図 14: 光センサーの取り付け</p>	

初期調整



1. レーザー1 のコネクタを外し，レーザー2 のコネクタを直流安定化電源の電力供給のソケットに挿入しなさい。注：レーザー2 は，特定の入射角にすでに調節されている。レーザー光源には触れないこと！
2. E-I で使った反射板を木の台の下のボルトを回して取り外しなさい（図 15）。
3. E-I で使ったスクリーンを取り外して，光センサーをスクリーン台に挿入しなさい。トラックのガイドレールの上にスクリーン台を置きなさい。
4. 作業台に取り付けた木製ガイドにネジ足が接触するように、木製台[6]の位置を決めなさい(図 16)。
5. 振動子/レーザー光源装置のプラスチック・カバー横のチャックを開けて、水をトレイ[12]に注ぎなさい。水はメスシリンダー[17]を使って正確に 500 ml 測りなさい。
6. レーザーのスイッチを入れなさい。反射されたレーザースポットが光センサーの中心に来るようにしなさい。光センサーをレールに沿って前後に動かしたとき、レーザースポットがまっすぐ鉛直方向に移動しなければならない。レーザースポットが正確に開口部に来るように木製台を横方向に、光センサーを鉛直方向に微調整しなさい。レーザースポットの中心と開口部の中心とを一致させるには、光度計の値がおよそ最大になるように調整すれば良い。
7. 振動片は、すでに正しい位置（鉛直方向）に調整してある。黒いつまみ[14]には触れてはならない！（図 17）。
8. 振動装置は、水平に前後に動かすことができる。振動装置の位置決めマーカーは、物差し上での振動子の位置を示している[10]。
9. データを記録している間、水面を気流から保護するためにビニールカバーのチャックは閉めておきなさい。

実験問題

Part C: レーザー光と水面のなす角 θ の測定

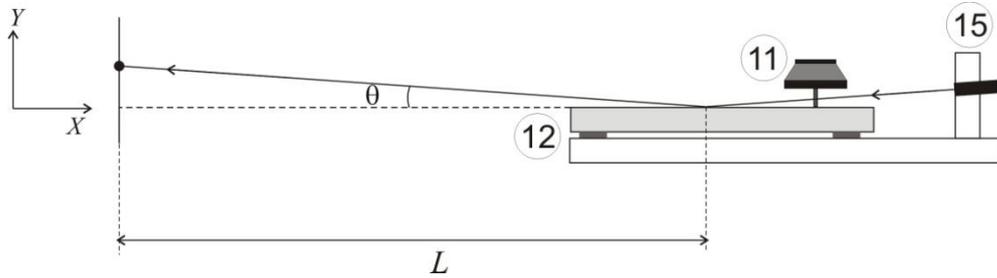


図 18: 反射角 θ の測定装置

Tasks	Description	Marks
C1	光センサーをガイドレールに沿って適当に動かさない。光センサーの X 方向の変位とレーザースポットの Y 方向の変位を表 C1 に書き記せ。(光度計のレンジは適切に設定すること)	1.0
C2	グラフを描き (「グラフ C1」と記す)、直線の傾きから反射角 θ を決定せよ。角度の単位は度を用いること。	0.6

Part D: 水の表面張力 σ の測定

光の回折の理論によると、表面波の波数 $k = \frac{2\pi}{\lambda_w}$ は

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_L} \sin \theta \sin \gamma \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 λ_w と λ_L はそれぞれ表面波とレーザーの波長であり、角度 γ は表面波による 0 次の回折光と 1 次の回折光がなす角である (図 19)。

表面波の振動数を f 、角振動数を $\omega = 2\pi f$ とする。水の密度を ρ とすると角振動数 ω と波数 k の間の関係は

$$\omega = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} k^q \quad (2)$$

で与えられる。ここで q は整数である。

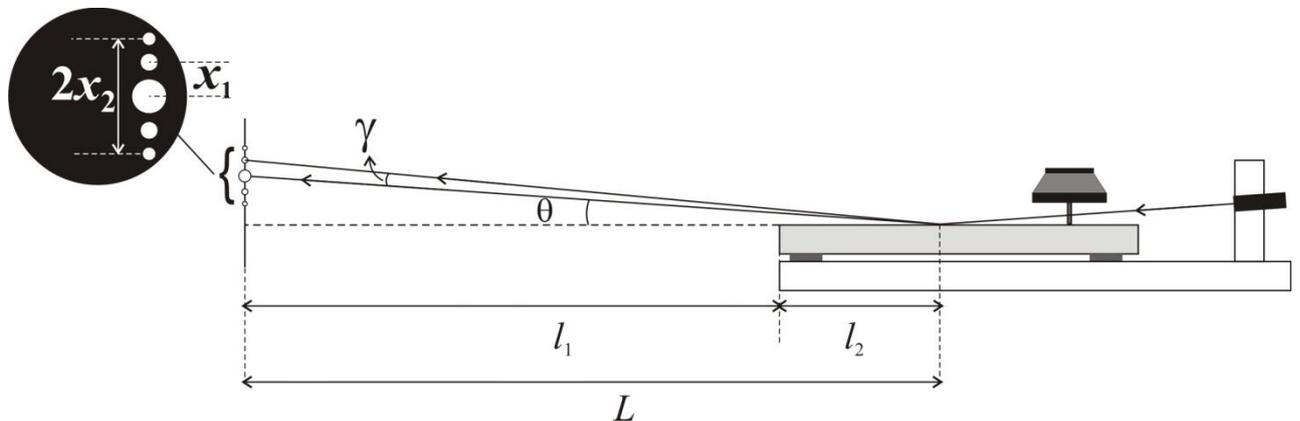


図 19: 実験装置の概略図

1. まず、スクリーンの土台のねじを締めて、図 1 で示された位置に光センサーを固定せよ。光度計のレンジを測定に適切な範囲に設定せよ。

作業	説明	Marks
D1	水の入ったトレイの端と光センサーの間の距離 l_1 を測定せよ。水面によるレーザー光の反射点にスポットが見えるはずである。スポットの中心と水の入ったトレイの端の間の距離 l_2 を測定せよ。それらの和 L を求めよ。測定結果を答案用紙に記録せよ。	0.3

2. 振動子のマーカが水平方向の定規の 7.0 cm の位置に来るように設定せよ[10]。
3. 振動子の周波数を 60 Hz に設定し、1 次と 2 次の明点をはっきりと区別できるように振幅を調整せよ(図 19 の挿入図)。

作業	説明	Marks
D2	上下 2 つある 2 次の明点の間の距離を測定せよ。測定結果から 1 次の明点と中心のピークとの距離 x_1 を計算せよ。得られた結果を表 D1 に記録せよ。周波数 f を適切なステップで増加させながら、この操作を繰り返せ。	2.8
D3	適当なグラフを描き、その傾きから q の値を求めたい。適切な縦軸と横軸の変数を特定せよ。それらの変数の値を表 D2 に記入せよ。グラフをプロットし、 q を求めよ(グラフ用紙には「グラフ D1」と書くこと)。これより整数値 q を明示して、方程式(2)を書き下せ。	0.9
D4	適当なグラフを描き、その傾きから表面張力 σ を求めたい。適切な縦軸と横軸の変数を特定せよ。それらの変数の値を表 D3 に記入せよ。グラフをプロットし、表面張力 σ を求めよ(グラフ用紙には「グラフ D2」と書くこと)。($\rho=1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1.2

Part E: 水面波の減衰係数 δ と水の粘性係数 η の測定

水面波は水の粘性により減衰する。水面波が振動子の位置から距離 s だけ伝播するとき、その振幅 h は減衰係数 δ で指数的に減衰する。

$$h = h_0 e^{-\delta s} \quad (3)$$

ここで、振動子のある位置での水面波の振幅を h_0 とする。

この実験では振動子の位置での水面波の振幅 h_0 は振動子に掛けられた電圧 V_{rms} と次のような関係がある。

$$h_0 \propto (V_{rms})^{0.4} \quad (4)$$

また、減衰係数は水の粘性係数と

$$\delta = \frac{8\pi\eta f}{3\sigma} \quad (5)$$

の関係式で結ばれている。ここで η は粘性係数である。

- 振動子のマーカが、水平方向の定規の 8.0cm の位置に来るように設定せよ。
- 振動子の周波数を 100Hz に設定せよ。
- ノギスを用いて光センサーを垂直方向に動かし、回折光の 1 次の明点がセンサー開口部に入るように調整せよ。
- 光度計の測定値がレンジ A で 100 になるように、振動子に掛ける電圧 V_{rms} を調整せよ。この時の V_{rms} を記録せよ。

5. レーザーが水面に入射している位置から 0.5 cm 刻みで振動子を離していき、各位置で光度計の測定値がレンジ A で 100 になるように、振動子に掛ける電圧 V_{rms} を調整せよ。各振動子の位置に対して V_{rms} を記録せよ。

作業	説明	Marks
E1	各振動子の位置に対する測定値を表 E1 にまとめよ。	1.9
E2	グラフを描き（「グラフ E1」と記す）、直線の傾きから減衰係数 δ を求めよ。	1.0
E3	測定用の水の粘性係数 η を計算せよ。	0.3