

報告書
実験番号：4
題目：光の性質

©MOOMOO

平成 15 年 6 月 26 日

目次

1	目的	1
2	原理	1
2.1	波の干渉	1
2.2	複スリットによる回折	4
2.3	単スリットによる回折	5
2.4	マイケルソン干渉計による光の干渉	6
3	実験方法	8
3.1	スリットによる回折	8
3.2	マイケルソン干渉計による光の干渉	8
3.3	使用器具	9
4	実験結果	9
4.1	複スリットによる回折	9
4.2	単スリットによる回折	9
4.3	マイケルソン干渉計による光の干渉	9
5	考察	10

1 目的

コヒーレントな光の干渉を調べ、光が波動性を持つことを理解する。

2 原理

2.1 波の干渉

2つ以上の波動が同時に1点に達したとき、その点でそれらの波動が互いに強め合い、あるいは弱め合う現象を「干渉」という。

もっとも簡単な場合として、同一方向に進む、波長 (λ [m]), 角速度 (ω [rad/sec]) が等しく、位相差が α [rad] の2つの正弦波 φ_1 , φ_2 の重なりを考える。

$$\varphi_1 = A_1 \sin(kx - \omega t) \quad (1)$$

$$\varphi_2 = A_2 \sin(kx - \omega t + \alpha) \quad (2)$$

ただし、 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

この場合の合成波は、

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = A \sin(kx - \omega t + \delta) \quad (3)$$

ただし、

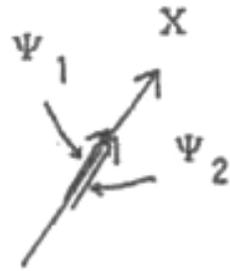
$$A = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \alpha \quad (4)$$

$$\tan \delta = \frac{A_2 \sin \alpha}{A_1 + A_2 \cos \alpha} \quad (5)$$

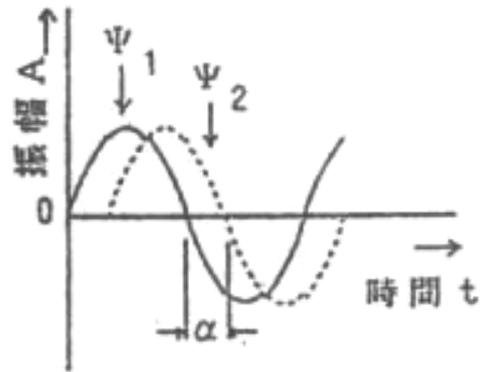
この波は、 $\varphi_1 \cdot \varphi_2$ と同一方向に進み、波長、角速度も等しい。式(3)・(4)・(5)からわかるように、 $\varphi_1 \cdot \varphi_2$ の位相差 α の値によって、 φ_1 と φ_2 は強め合ったり、弱め合ったりする。

1. $\varphi_1 \cdot \varphi_2$ の位相差; $\alpha = 2n\pi$ (n:整数) のとき

$$\delta = 0, A = A_1 + A_2 \cdots \varphi_1, \varphi_2 \text{は強め合う}$$



(a) :波と進行方向との関係



(b) :振幅と位相との関係

図 1: 2つの波の関係

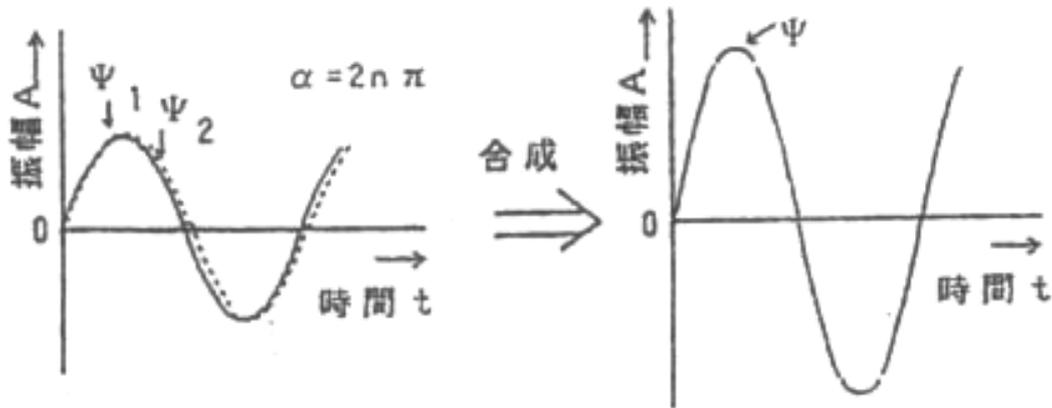


図 2: 強め合う場合

2. $\varphi_1 \cdot \varphi_2$ の位相差; $\alpha = (2n + 1)\pi$ (n :整数) のとき

$\delta = 0$, $A = A_1 + A_2 \cdots \varphi_1, \varphi_2$ は強め合う

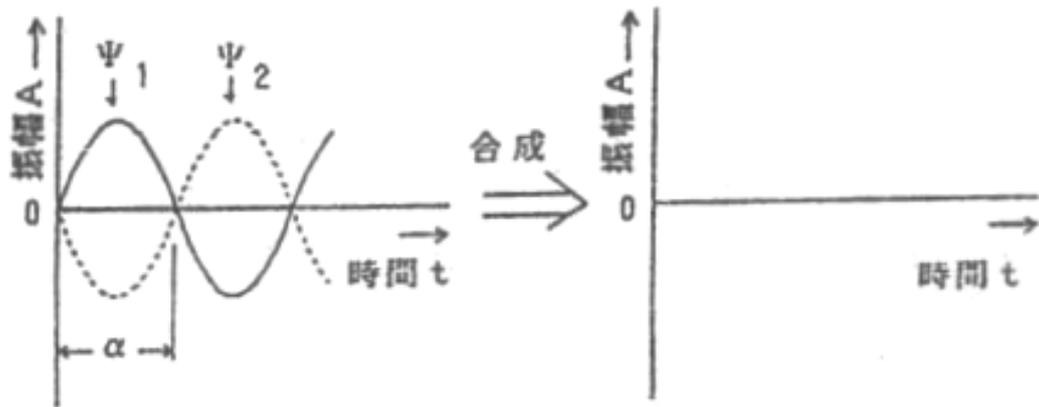


図 3: 弱め合う場合

2.2 複スリットによる回折

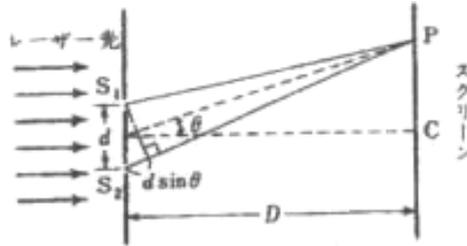


図 4: 複スリット

2本のスリット S_1, S_2 (間隔 d) をレーザー光で照らすと、各スリットから二次波が放射状に広がって出ていく。そして、これらの二次波の重なりによって干渉を起こし、スクリーン上に明暗の干渉縞をつくる。いま、スクリーン上に P 点をとる(図4)。 S_1 および S_2 から二次波の P 点での振動をそれぞれ E_1 および E_2 とする。距離 S_1P と S_2P の差は、 $d \ll D$ として近似的に $d \sin \theta$ である(図4)。レーザー光の波長を λ とすると、振動 E_1 と E_2 の間の位相差 ϕ は $\phi = 2\pi \sin \theta / \lambda$ となる。そこで、振動 E_1 を $E_1 = E_0 \sin \omega t = (\omega = 2\pi C / \lambda; \text{角速度, } C; \text{光速})$ とすると、振動 E_2 は $E_2 = E_0 \sin(\omega t + \phi)$ と書ける。したがって、 P 点での合成振動 E は、

$$E = E_1 + E_2 = 2E_0 \cos \frac{\phi}{2} \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\phi}{2} \right) \quad (6)$$

となり、右辺の因数 $2E_0 \cos \frac{\phi}{2}$ が合成振動の振幅となる。 P 点での光の強さ $I(\theta)$ は振幅の2乗で与えられるから、

$$I(\theta) = 4E_0^2 \cos^2 \frac{\phi}{2} = 4E_0^2 \cos^2 \left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) \quad (7)$$

となる。すると、関係

$$d \sin \theta = \pm m \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (8)$$

を満足する方向 θ で $I(\theta) = 4E_0^2$ (最大) となり、もっとも明るくなる。一方、

$$d \sin \theta = \pm \left(m - \frac{1}{2} \right) \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (9)$$

の関係を満たす方向 θ で $I(\theta) = 0$ となり、もっとも暗くなる。ここで、 m を次数という。

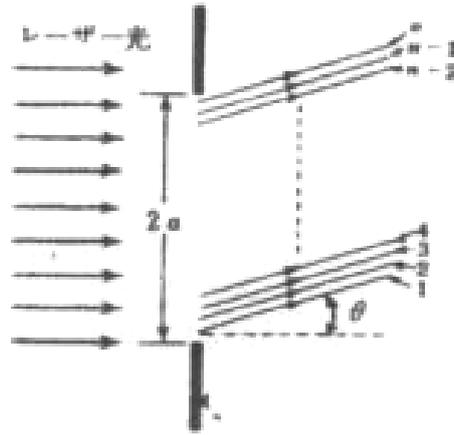


図 5: 単スリット

2.3 単スリットによる回折

有限の幅 $2a$ の単スリットをレーザー光で照らした場合を考える。この幅 $2a$ のスリットは無限に細かいスリットが隙間無く無数に並んでいるとして扱われる。いま、幅 $2a$ を図 5 のように n 等分し、分割された各スリットからの二次波のスクリーン上のある一点での振動を $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ とする。開口内の隣り合うスリットからの二次波のスクリーン上での位相差 ε は、

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2a}{n} \sin \theta \quad (10)$$

となる。1 番目のスリット (開口の下端) による振動を $E_1 = \frac{E_0}{n} \sin \omega t$ とすると、 i 番目のスリットからの振動 E_i は

$$E_i = \frac{E_0}{n} \sin \{ \omega t + (i-1)\varepsilon \} \quad (11)$$

となる。すると、合成振動 $E = \sum_{i=1}^n E_i$ は、

$$E = \frac{E_0}{n} \frac{\sin \frac{n\varepsilon}{2}}{\sin \frac{\varepsilon}{2}} \sin \left[\omega t + \frac{(n-1)\varepsilon}{2} \right] \quad (12)$$

となる。ここで、積 $n\varepsilon$ を一定に保って $n \rightarrow \infty$ とする \lim を取ると、

$$A(\theta) = E_0 \frac{\sin \alpha}{\alpha} \quad (13)$$

になる。ここで、 $\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta$ である。合成された光の強さ $I(\theta)$ は、

$$I(\theta) = [A(\theta)]^2 = E_0^2 \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2} \quad (14)$$

となる。 $\alpha = m\pi$ のとき $I(\theta) = 0$ となるから、もっとも暗い方向 θ は、

$$2a \sin \theta = \pm m\lambda (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (15)$$

から求まる。一方もっとも明るくなる方向 θ は $2a \sin \frac{\theta}{\lambda}$ が表 1 に示した値を取るときの θ の値として決まる。図 6 は合成された光の強さの分布を示す。

表 1: 単スリットでの明線になる角度

次数	1	2	3	4	5
$2a \sin \frac{\theta}{\lambda}$	1.43	2.46	3.74	4.48	5.48

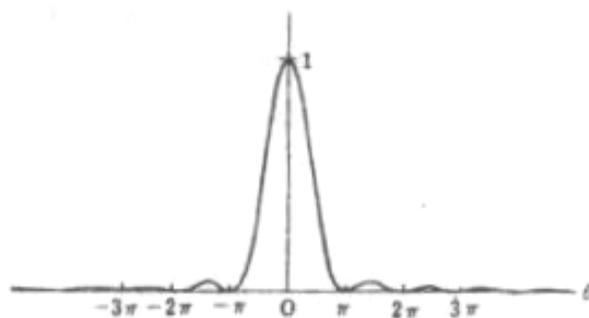


図 6: 単スリットによる回折の光の強さ

2.4 マイケルソン干渉計による光の干渉

図 7 が今回使用したマイケルソン干渉計である。

レーザー光線をハーフミラーによって固定ミラーと微動ミラーの方向に分割し、再び合成したものをスクリーンに投影すると干渉縞が得られる。

このことをより詳細に説明したのが図 8 である。スクリーン上で再び合成された 2 つの光は光路長の差をもつためスクリーン上に干渉縞ができる。

このときの干渉縞の明るさ I は、

$$I = I_1 + I_2 \cos(k\delta) \quad (16)$$

で与えられる。ただし、 k はレーザーの波長を λ とするときの $\frac{2\pi}{\lambda}$ 、 δ は光路長の差であ

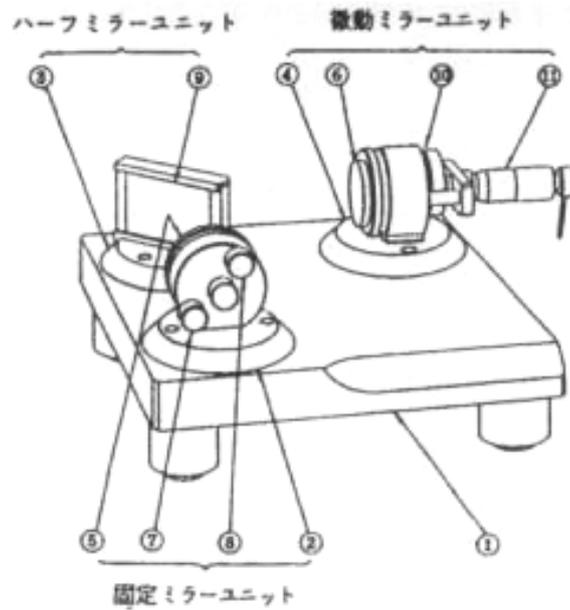


図 7: マイケルソン干渉計 MJ-15

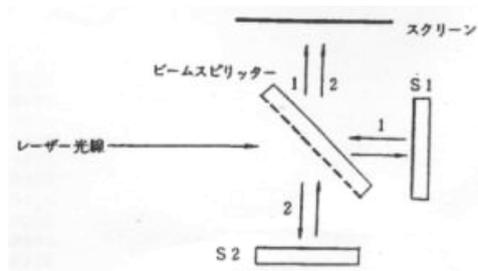


図 8: マイケルソン干渉計の原理

る。微動ミラー (または図 8 の S_1) を光軸に沿って ΔS だけ移動すると、 δ は $2\Delta S$ 変化する。すなわち光路差が $\frac{\lambda}{2}$ 変化する度にスクリーン上では明線と暗線が入れ替わる。

いま、 ΔS の変化により、 n 回の明暗の反転が生じたとすると、

$$n \frac{\lambda}{2} = \Delta S \quad (17)$$

$$\lambda = 2 \frac{\Delta S}{n} \quad (18)$$

つまり、 ΔS と n を知ることで波長 λ を求めることが出来る。

3 実験方法

3.1 スリットによる回折

単スリットも複スリットも方法はほぼ同様である。レーザー光源から出た光をスリットに通し、縦に固定した方眼紙上にこの光によって干渉縞が出来るように各装置を配置する。このとき、上記の3つの装置は十分離れていなければならない。

干渉縞の光軸(1番明るい場所)からの距離と m (何番目の縞か)を記録する。また、スリットの幅(またはピッチ)も必ず記録しておき、 m と θ から計算によって出した値と比較する。

3.2 マイケルソン干渉計による光の干渉

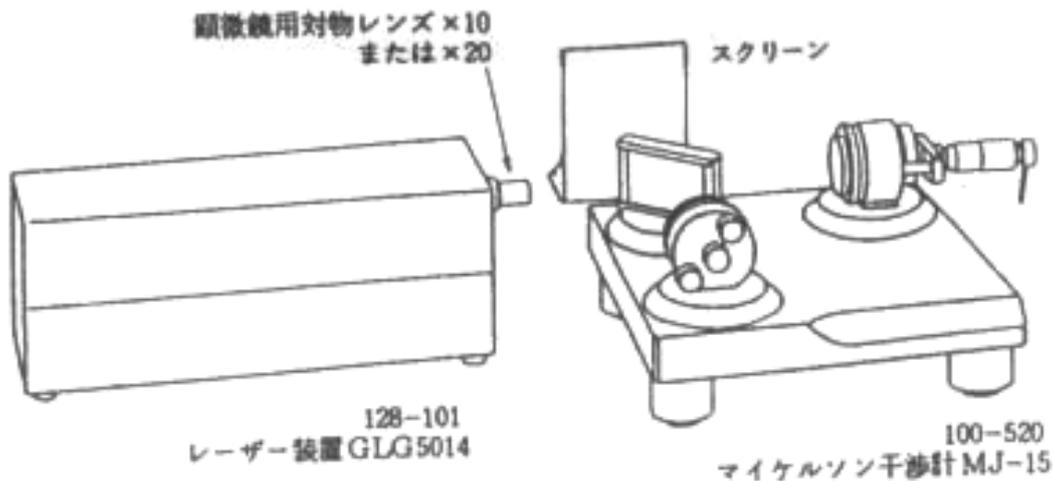


図9: マイケルソン干渉計による実験のための装置の配置

1. 図9のように装置を配置する。
2. スクリーン上に干渉リングが出来るように微動ミラー・固定ミラー・ハーフミラーの光軸を正確に一致させる。
3. 顕微鏡用対物レンズをレーザー装置に取り付ける。
4. 1.000[mm]–1.500[mm] の範囲で微動ミラーをゆっくり前進させ、20周期ごとに微動ミラーを変化させた量を記録する。

5. ΔS と n のグラフの傾きから λ を計算し、規定の値と比較してみる。

3.3 使用器具

単スリット
複スリット
マイケルソン干渉計
He-Na レーザー光源

4 実験結果

4.1 複スリットによる回折

4.2 単スリットによる回折

4.3 マイケルソン干渉計による光の干渉

表 2: 実験結果

ミラーの移動量 ΔS [μm]	移動した本数 m [-]
7.0	20
16.5	40
21.0	60
27.0	80
33.0	100
39.5	120
46.5	140
52.2	160
58.2	180
64.5	200

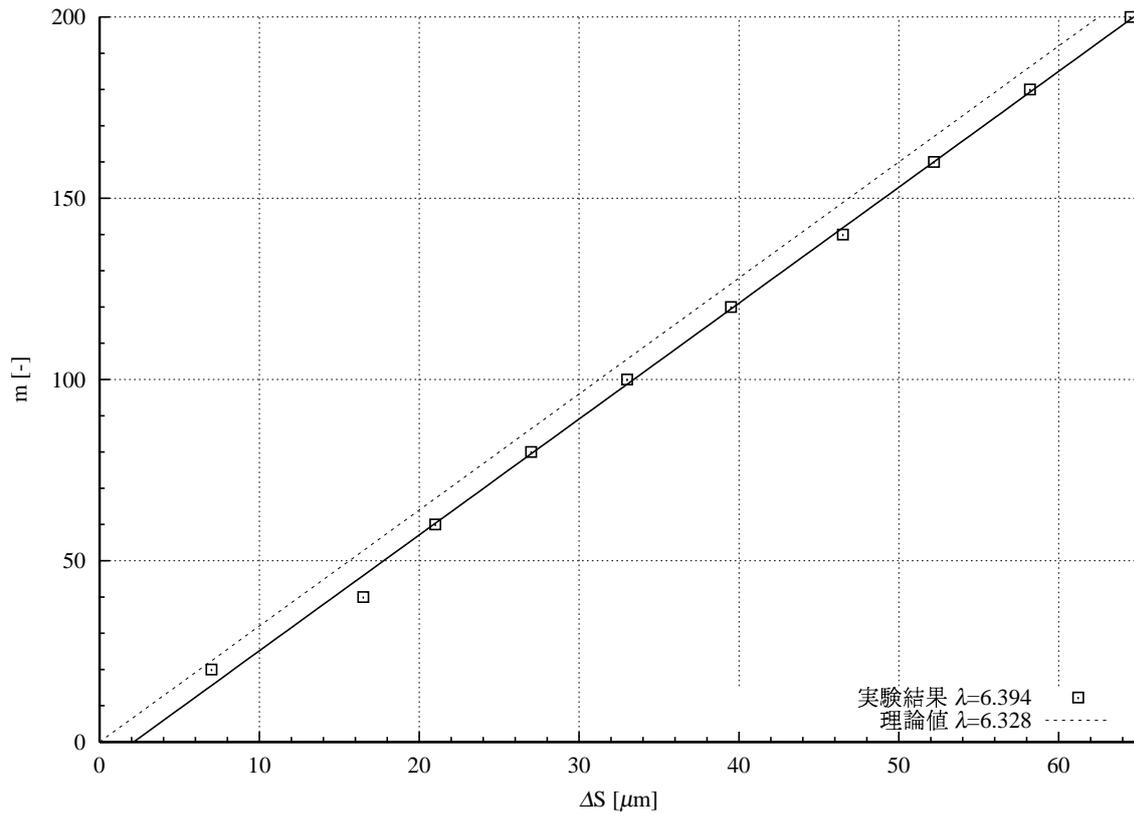


図 10: 最小 2 乗法により ΔS と n の傾きを調べた結果

5 考察

参考文献

- [1] 『光の性質』, 指導書, 2003
- [2] 『光の性質—マイケルソン干渉計による光の干渉実験—』, 2003