

トールボット干渉計による位相差の測定

量子・物質工学科 清水和子 研究室 小林 靖典

1. 背景・目的

本研究室では、原子干渉計の研究を行っている。現在、その1つの方法として、トールボット干渉計の開発を行っている。

本実験は、そのトールボット干渉計の基礎実験として、光（レーザー）を用いて、トールボット干渉計によって得られるフーリエ像の変形から位相物体の情報を解析することを目的としている。

2. 原理・特徴

トールボット干渉計とは、単色な平行光と、2枚の格子によって構成され、1836年にTalbotによって初めて報告された現象であるトールボット効果を利用したシアリング干渉計である。このトールボット効果とは、単色な平行光（波長 λ ）で格子を照射すると発生した回折光どうしの重ね合わせの結果、格子の後方 $2md^2/\lambda$ （トールボット長）のところに格子の直後とまったく同じ光の強度分布が得られるというものである。（ m :整数 d :格子定数 λ :波長）この格子状の光の強度分布はフーリエ像と言われている。

このフーリエ像に2枚目の格子を重ねると、干渉縞であるモアレ縞が観察できる。格子とその後方 md^2/λ にある”フーリエ像”との間に位相物体を入れると、モアレ縞が変形する。このモアレ縞の変形量を定量的に求めることによって物体の位相分布を測定する。これがトールボット干渉計の基本原理である。

トールボット干渉計は、

- ）構造が簡単で、コンパクトであり、調整が容易である。
- ）ほぼコモンパス干渉計になっているので安定した縞図形が得られる。
- ）干渉計に残っている波面収差による測定誤差のほとんどを除くことができる。

などの利点がある。

平行光化された、波長 λ のレーザー光で、格子定数 d の格子 G を照射すると、格子 G によって多数の回折波が発生する。観測面 P ($z = z_p$) 上における、位相物体による0次回折光波面形状の変形を $g(x, y, z_p)$ とする。また、格子 G と同じ格子定数の透過型マスター格子 G_m との間に、光軸 (z 軸) のまわりに ($\theta = 0$) だけ回転してネジレ角を与え、”フーリエ像”に重ね合わせてモアレ縞を発生させる。

発生するモアレ縞の縞間隔や縞の傾き、縞の変形は以下の式で表される。

$$\left(\begin{array}{l} = 0 \text{ のとき} \\ 0 \text{ のとき} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (z_p - z_0)(\partial g / \partial x) = nd \\ y = (\cos \theta - 1)x / \sin \theta + (z_p - z_0)(\partial g / \partial x) / \sin \theta + nd / \sin \theta \end{array}$$

(g : 位相物体による 0
 次回折光に生じた観測面
 上の波面収差 n : 整
 数)

3 . 実験

本実験では、光源に波長
 $= 632.8\text{nm}$ の He - Ne
 レーザーと格子定数 $d =$
 0.1mm の 2 枚の透過型回
 折格子を用いた。この干渉

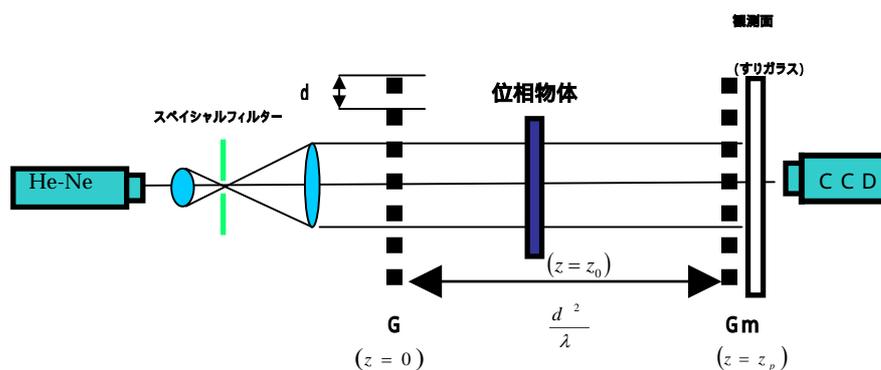


図 1 : 光学系

計では、トールボット長は $(d^2/\lambda) = 15.8\text{mm}$ となる。図 1 は実験に用いた光学系の配置図である。He-Ne レーザーから出た光を 2 つのレンズを用い平行光化すると共にビーム径を大きくし、干渉計に入れた。トールボット長 $((d^2/\lambda) = 15.8\text{mm})$ を満足する位置に格子と同じ格子定数のマスター格子を置く。マスター格子の直後に拡散板 (スリガラス) を置き、これを観測面として CCD でその像をとらえた。また、良いモアレ縞を得るために、レンズとレンズの間で、スペイシャルフィルタリングした。

(実験 1) $\theta = 0$ のときの visibility

片方の格子を x 方向にずらす事によって透過する光の強度の変化を観測した。そのデータを以下に示す。1 枚目の格子直後の強度分布は矩形派のように表わされるので、その積分は三角はとなるはずなのでよい結果が得られた。

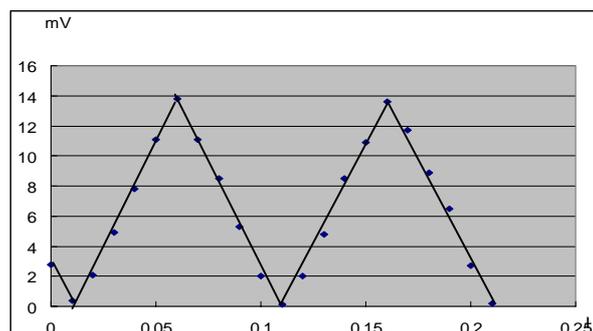


図 2 : visibility の変化

(実験 2) ネジレ角 θ を変化させた時の縞間隔の変化

上の基本式から縞間隔を表す部分は $d/\sin \theta$ であり、縞間隔はネジレ角 θ に依存していることがわかる。実際に θ を変化させて観測できたモアレ縞を図 3 に示す。

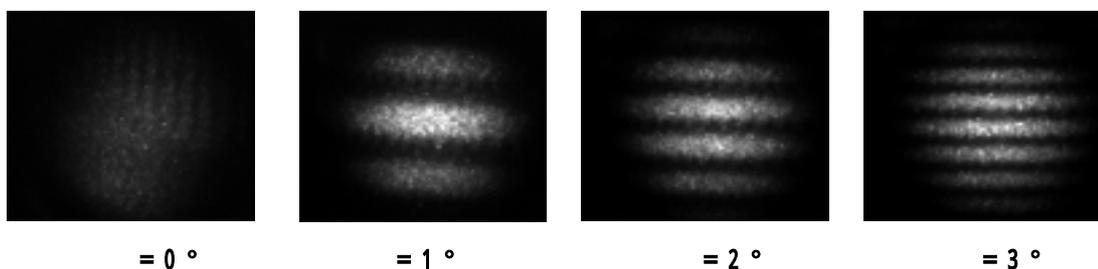


図 3 : θ を変化させた時のモアレ縞の変化

(実験3) コントラストの変化

コントラストの変化は、2枚の格子の距離に依存する。トールボット干渉計の原理からわかるように、フーリエ像ができる場所に2枚目の格子を重ねることが重要だからである。片方の格子をy方向に $d/2$ から $d/2(2)$ まで動かし、そのモアレ縞を観察した。(図4参照) 縦方向(y軸方向)の強度分布を解析してみると、2枚の格子間隔がトールボット長に近づくとコントラストはよくなり、最も良い時 visibility 82.2%を得た。

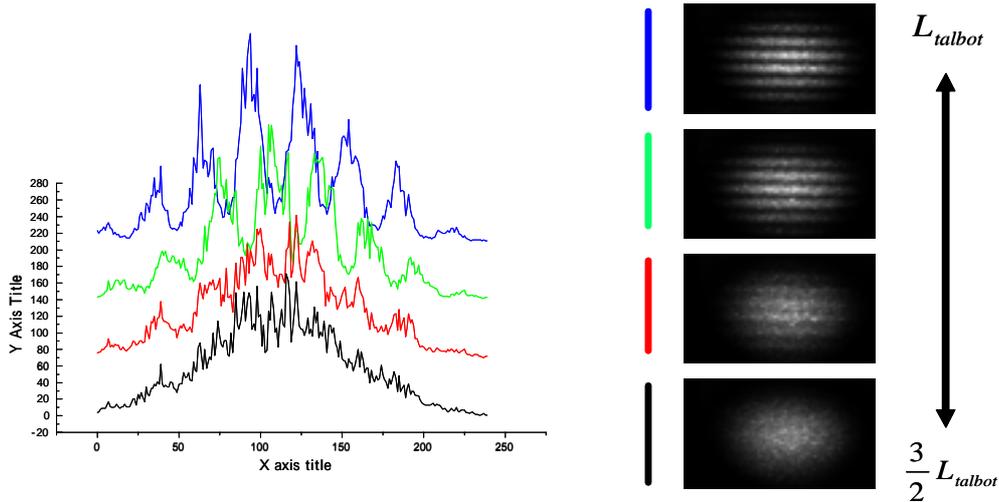


図4：コントラストの変化

(実験4) 位相物体の測定(屈折率の測定)

位相物体を格子と平行に格子間に挿入したときのモアレ縞を観察すると、光路差によって位相物体を通ってきた側の像は、格子を $d/2$ に置いているにもかかわらず、コントラストが低下していることが観察される。(図5参照) これは位相物体を通過してきた光に光路差が生じ、トールボット長がシフトしたためと考えられる。

実際に格子を少し動かすと位相物体を通過してきたほうが、コントラストがよい像をとることができる。

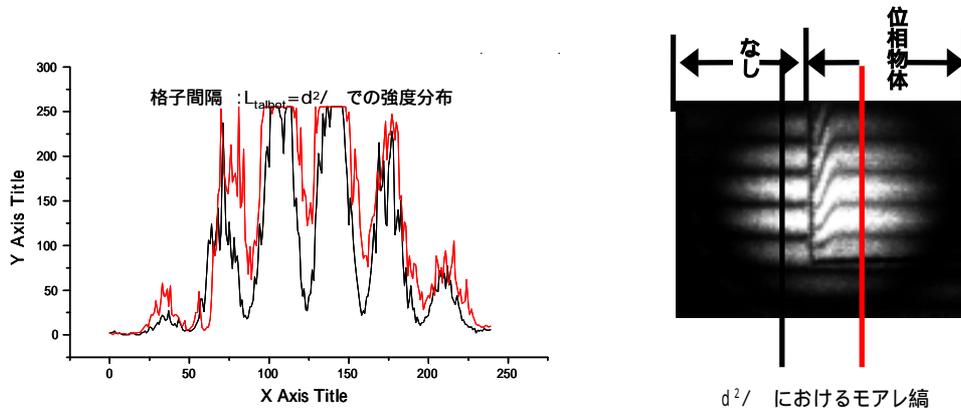


図5：コントラストの比較

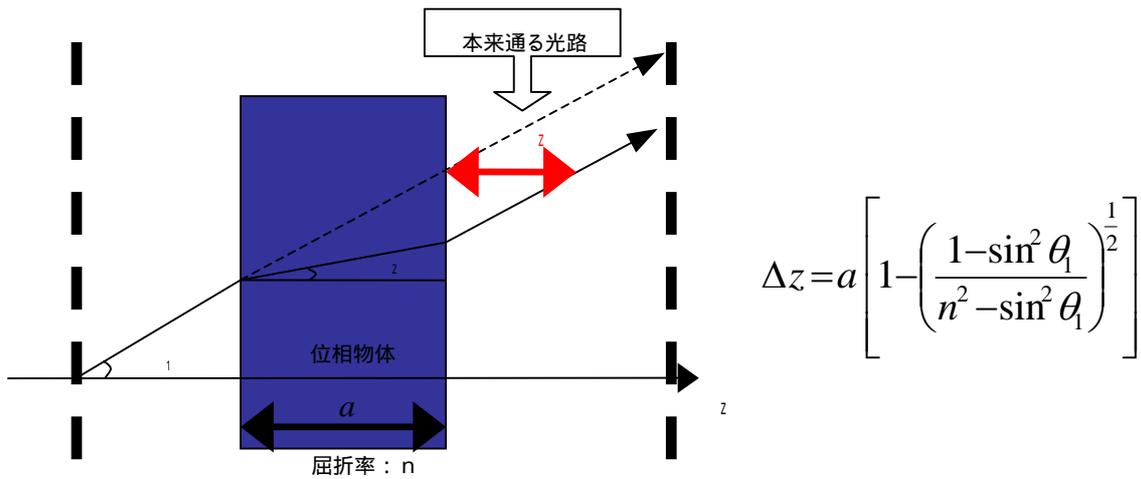


図6：位相物体による1次回折光のz軸方向のずれ

光路差を幾何学的に求めると図6のようになる。実験値 z と厚さ a を考慮し上式を用いて屈折率を求めた。実験値の誤差は、コントラストの分解能によるものである。位相物体、アクリル板・スライドガラスについて測定してみると、文献値とほぼ一致する結果が得られた。(下表参照)

位相物体	n:屈折率	a:厚さ (mm)	z:実験値 (mm)	visibility(%)	屈折率
アクリル板 (厚)	1.49	10.0	3.30 ± 0.1	78.2	1.49 ± 0.02
アクリル板 (薄)	1.49	5.0	1.65 ± 0.1	82.9	1.49 ± 0.04
スライドガラス × 2	1.52	1.3 × 2	0.80 ± 0.1	79.3	1.45 ± 0.1
スライドガラス	1.52	1.3	0.40 ± 0.1	83.0	1.46 ± 0.2

4 まとめ

- トールボット干渉計を实际組んだ。
- 縞を鮮明にするためビームウェイストを測定し、スペイシャルフィルターを使用した。鮮明な像が得られた。
- トールボット干渉計の基本的な特徴 (コントラスト、ネジレ) について干渉縞をとらえ解析した。
- トールボット干渉計の特徴から位相物体によるモアレ縞のずれから屈折率を測定した。理論値とほぼ一致。