

# フレネル回折現象への遮光体の 厚みの効果についての実験的研究

金 井 徳 兼

## Experimental Studies of Fresnel Diffraction Pattern Made by Thick Obstacles

Norikane KANAI

ABSTRACT. The pattern observed in the geometrical shadow region of obstacles with extremely thin thickness in Fresnel diffraction phenomenon is found to be made by interference of the boundary diffraction waves by previous study. The effect on the formation of such interference patterns by thickness of obstacles is studied experimentally. The effects are found in the interference fringes spacing and the intensity. It is found that the interference fringes and intensity decrease.

### § 1. 序論

回折端に光が入射するとその境界より境界回折波なる2次球面波が生じることは古くから知られており、理論と実験の両面から研究されてきた。

特にレーザ光をもちいて遮光物体の作るフレネル回折像のなかで幾何光学的陰影に生じるパターンは各境界より生じた境界回折波の相互干渉によって生じることを本学伊藤博教授とともに研究を行なった<sup>1)</sup>。

通常の回折現象を取扱ったFrenel-Kirchhoffらの理論<sup>2)</sup>では回折端は入射波長にくらべて無限に薄いという仮定されている。電磁氣的に取扱うと回折端は完全導体として取扱われるはずである<sup>3)</sup>。

しかしながら我々が実験室レベルで取扱う単色光の回折現象では回折端は必ずしも波長に較べて無限に薄いという仮定をみたしてはいないが、鮮明な回折象を観測する事ができる。

本報告書では、特に遮光体のフレネル回折現象に注目し、その幾何光学的陰影部に生じるパターンと遮光体の光軸方向への厚みとの関係について実験的研究を行なった結果を報告することとする。

### § 2. 幾何光学的陰影部に生じるパターンと境界回折波

境界回折波はふるくはヤングが提唱しその後、A. Rubinwicz, 宮本健郎 - E. Wolf<sup>4)</sup>らによって定式化された。すなわち入射光が回折端で一種の反射を受け伝搬する波である。

我々の前の報告では遮光物体は必ずしも厚みが回折理論で仮定されれている薄い物体ではないため、その境界として物体のスクリーン上での2次元的射影をその物体の境界と仮定

して、その境界部を2次球面波の波源の位置として取扱ってきた。

直方体遮光体に発散光を照射した際について考えることとする。

ヤングの考えによると、点光源を発した光が遮光体の光源に近い境界面の辺の各点から2次球面波が発生し全体として辺を中心とする円柱波が伝搬すると考えられる。モデルを簡単化するため光が入射した面（長方形）の短辺から生じる円柱波の影響を以下無視することにする。円柱波は光軸方向に伝搬しスクリーンに達する。

光軸方向の厚みを光源側の回折端で生じた2次波が遮光体の幾何光学的陰影部に回り込むモデルとして2つの簡単なモデルが考えられる。

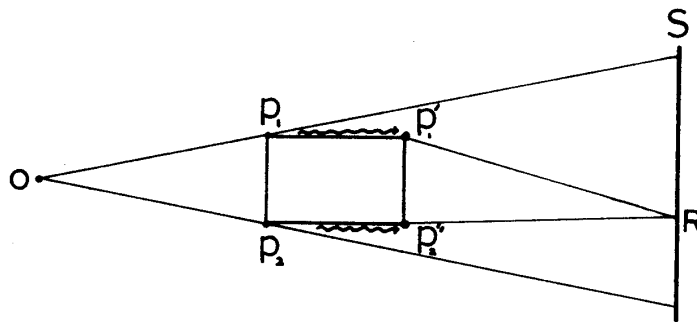


図1 (A) モデル1

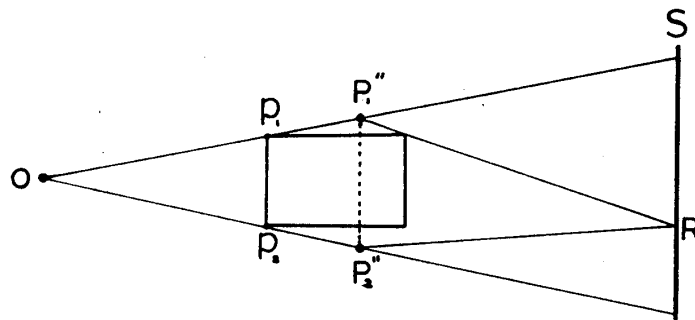


図1 (B) モデル2

第1のモデルとして図1 (A) のように、 $P_1$ 、 $P_2$ 光源に近い面で2次球面波が生じた際、側面を2次波が伝搬しスクリーンに近い境界 $P_1'$ 、 $P_2'$ が幾何光学的陰影部の干渉パターンを作る光源として働くと考えられるモデルである。

このモデルでは最初に生じた境界波が側面を伝搬する際に側面によって境界波が散乱されるため強度が減衰することが予想され、この為幾何光学的陰影部のパターンの強度も減少することが考えられる。

第2のモデルとして図1 (B) のように光源の位置が $P_1''$ 、 $P_2''$ 遮光体側面に上存在せず、充分幾何光学的陰影に回り込む位置に2次波源が生じると考えるモデルである。

この場合境界回折波の光源として遮光体の側面に垂直な位置  $P_1''$ ,  $P_2''$  の近傍の光が幾何光学的陰影部に回り込み干渉すると考える。

簡単な近似を用いると干渉パターンの間隔  $\Delta x$  は

$$\Delta x \sim \frac{\lambda Z}{D}$$

でえられる。ここで  $\lambda$  は入射光の波長、 $D$  は遮光体幾何学的な幅、 $Z$  は遮光体とスクリーンとの距離である。

第1モデルで考えるとスクリーンとの遮光体との距離  $Z$  が遮光体の厚みの分だけ減少するため、遮光体の幅が等しい場合でも厚みが増加するほど干渉パターンの間隔は減少すると考えられる。また第2のモデルでは遮光体の幾何学的な幅よりも干渉パターンに効果をおよぼす幅が大きくなるため、干渉パターンの間隔が減少すると考えられる。

さらに両方のモデルにおいても2次球面波の光源が必ずしも点光源になるとは限らないため干渉パターンの強度的な面においても厚みによる変化が生じると考えられる。

ヤング干渉の実験スリットの開口を大きくしたり、白色光を用いた実験では生じる干渉パターンの明暗の差が減少する<sup>5)</sup>。この現象と同じように回折端に厚みがあると2次球面波の波源は必ずしも点源として作用しない為、干渉パターンの強度、とくに明暗の差 (visibility) に厚みの影響が表れると考えられる。

これらの仮定をもとに遮光体の厚みの効果をフレネル回折像の幾何光学的陰影部に生じるパターンの中に見つけ出すために実験を行なった。

### § 3. 実験

遮光物体のつくる回折像が厚みによって変化するかについて調べていくことにした。実験で使用した遮光物体として幅が1 mmで光軸方向への厚みが増えるような直方体をもちいた。

境界部あるいは面の仕上り精度が幾何光学的陰影部のパターンに影響を及ぼすため遮光体の各面、各辺は研磨された精度のよいJ I S一級ブロックゲージを使用した。また無限に薄い場合の近似として入射光が境界で接すると考えられる径が1 mmの金属ワイヤーを用いた。厚みの変化として3、9、30 mmを用いることとした。

光学系として図2のような遮光体の幾何光学的陰影が生じるフレネル回折光学系をもちい、光源として出力、周波数とも安定化されたHe-Neレーザ(波長632.8 nm、出力2 mW)を使用した。また、遮光体の光源に近い面とスクリーンとの距離を0.168 mとした。

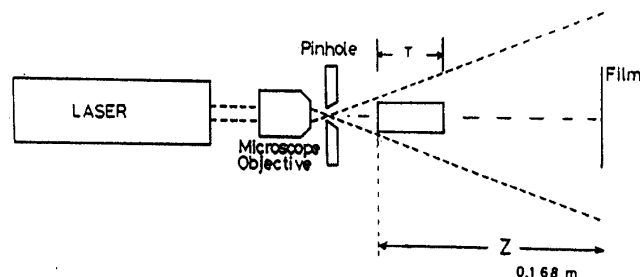


図2 実験で使った光学系

### § 3 - 1 . 実験 1 遮光物体の厚みの増加にともなう干渉パターンの変化

光軸方向への厚みの変化にともなうフレネル回折像および幾何光学的陰影に生じる干渉パターンの強度および幾何学的な構造の変化を調べることにした。

実験として厚みの効果によるパターン幾何学的構造の変化とくに干渉パターン隣接する縞の間隔の変化について写真計測した。遮光物体の光軸に垂直な厚み（幅）を一定とし、光軸方向への厚みを変化させた。

厚みの無視できる円柱や厚みの薄い金属片のパターンの実験とは異なり光軸に遮光体を固定する事はかなり困難なことである。

すなわち入射光を境界部に入射することができにくい。

実験ではスクリーンに生じたパターンが肉眼で明らかに変化したと判断できるくらいわざと光軸に対して遮光物体を傾けその場合に生じたパターンと観測したパターンとの差を実験によって生じた最大の誤差として、特に干渉パターンの間隔測定を行なった。

また回折および干渉によって生じるパターンの光強度分布を計測するたスクリーン上での光分布を一次元の移動ステージ上の光ファイバーおよび光電子増倍管をもちいて計測した。

### § 3 - 2 . 実験 2 境界回折波の波源の位置と側面光強度測定

境界回折波は一種の反射光であると考えられる。

厚みのある物体の側面でどこが境界回折波の光源として作用しているかを調べるために遮光物体の側面での回折あるいは入射光の反射垂直、平行成分がどのような分布をしているか、遮光物体の厚みを変えて計測することとした。

計測方法として実験 1 の強度計測と同じように光ファイバをもちい直方体遮光物体の側面に垂直方向、平行方向に移動し各位置での光強度を計測した。

## § 4 . 実験結果

### § 4 - 1 . 実験 1

実験によって得られたブロックによる回折像を写真 1 に示す。光軸方向への厚みが増加することによって、通常フレネル回折像には大きな変化は生じてはいないが、幾何光学的陰影部分に生じるパターンすなわち境界回折波の相互干渉によって生じるパターンのコントラストが減少する。

とくに幾何光学的陰影に生じる干渉パターンの間隔を測微計をもちいて計測した結果を表 1 に示す。



写真1 (A)

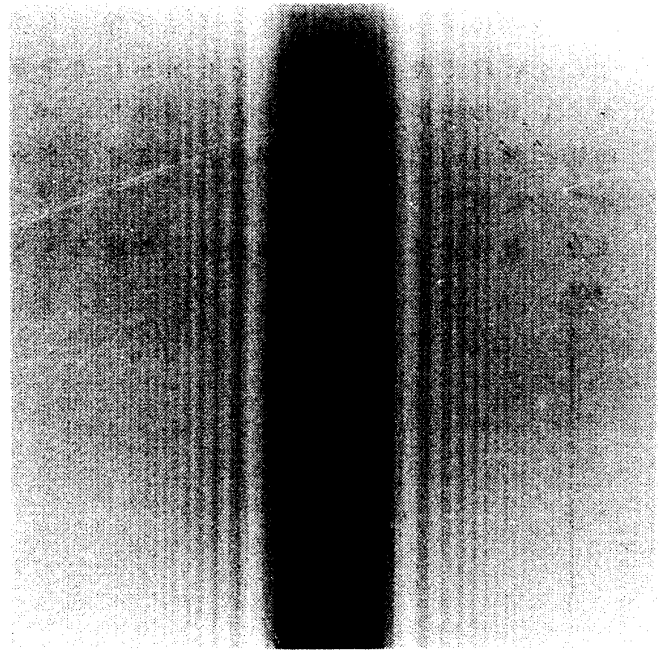


写真2 (B)

写真1 (A) 径が1 mmの金属ワイヤーの作るフレネル回折像  
 (B) 幅1 mm厚み30 mmの金属ブロックの作る回折像

光軸方向へ 遮光体の厚み (mm)	干渉パターン の隣接する間隔 ( $\times 10^{-4} \text{ m}$ )
~ 0	1.06 $\pm 0.01$
3.0	1.01 $\pm 0.03$
9.0	0.98 $\pm 0.02$ (+0.04)
30.0	0.80 $\pm 0.04$ (+0.07)

表1. 幾何光学的陰影に生じる干渉パターンの間隔

表内の+-の誤差は間隔の標準偏差を示し、()内の誤差は遮光体のセッティングの際に生じると考えられる最大誤差である。

最大誤差を考慮しても厚みの増加にしたがって干渉パターンの間隔が減少する傾向の結果が得られた。

厚みの増加によって生じる回折像ならびに干渉パターンの強度変化をワイヤーの強度変化を破線で最大の厚み(30 mm)の強度変化を取り上げ図3に示す。厚みの増加してもフレネル回折像にはほとんど変化しない。しかし幾何光学的陰影部に生じるパターンは明暗の差(visibility)が変化することがわかる。さらに厚みの増加とVisibilityの変化を図4に示す。

また 幾何光学的陰影部分全体的な明るさも厚みの増加にともない減少する傾向にある。

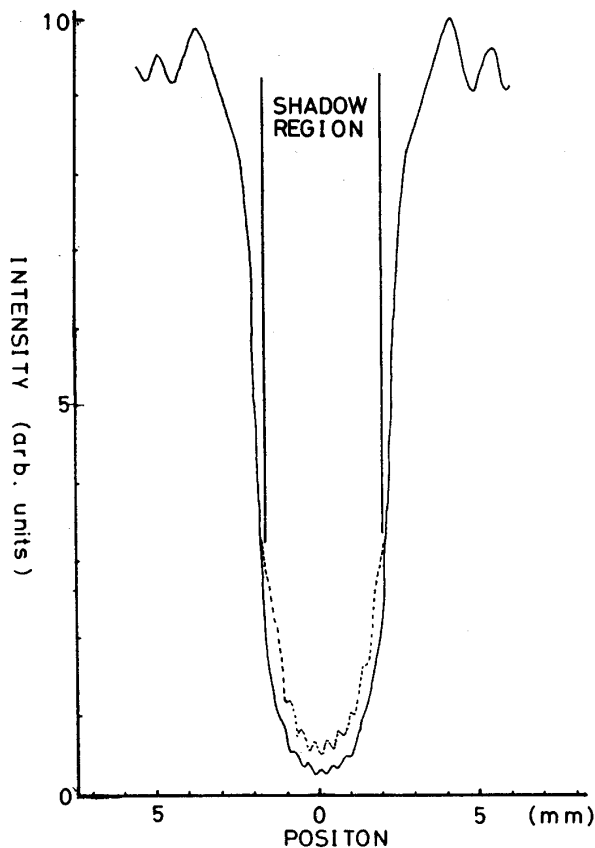


図3. 遮光体の厚みの変化と回折干渉パターンの強度変化

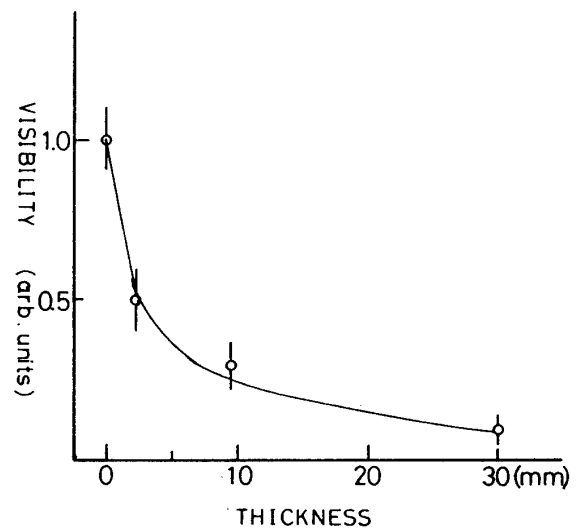


図4. 遮光体の厚みと干渉縞の明暗の変化

#### §4-2. 実験2

図5は厚みが30 mmの直方体遮光物体の入射光(あるいは回折光)の強度の側面方向への変化を示している。遮光体の側面平行方向への回折波の強度は減少スクリーンに向うにつれて減少する。

図6は側面の反射光成分の計測結果である。この結果から側面反射光は光源に最も近い回折端に最大の強度のピークが生じ、またスクリーンに近い側のエッジに小さなピークが生じた。側面では入射光の反射は行なわれていない。

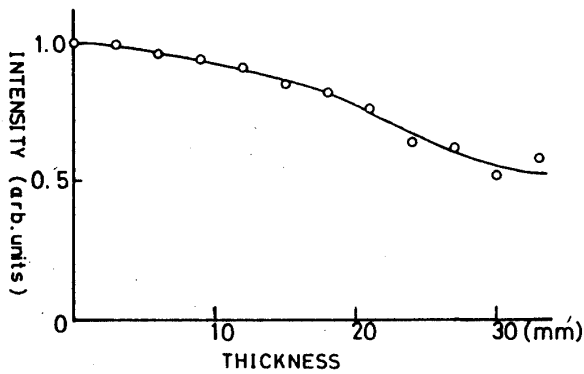


図 5 . 側面に平行な伝搬波成分

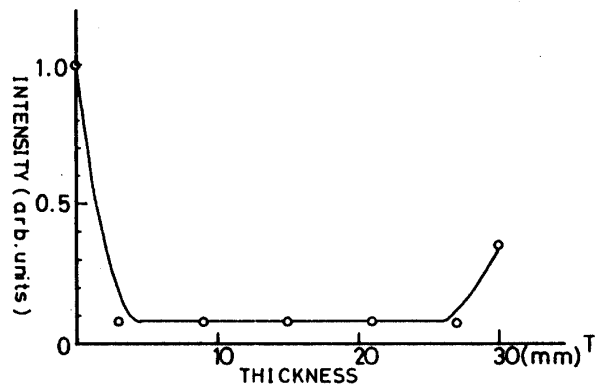


図 6 . 伝搬波の側面反射成分

### § 5 . 実験結果の考察

厚みを無視した場合の幾何光学的陰影部に生じる干渉パターンの隣接する間隔は今回の実験条件より  $1.06 \times 10^{-4} \text{ m}$  であるが、干渉パターンの間隔は厚みの増加によって減少する傾向にあり、モデル 1 および 2 のどちらかの仮定を裏付ける結果である。干渉縞の間隔の計測結果からモデル 1, 2 的解釈で干渉パターンを作る光源の位置を厚みが 9 mm の場合を例に取り上げ求めてみると、モデル 1 の場合遮光体の幅 1 mm と固定しパターン間隔から  $z$  を求めると  $0.155 \pm 0.006 \text{ m}$  となる。またモデル 2 を適用すると干渉パターンへの効果のある幅 ( $D$ ) として  $1.06 \pm 0.01 \text{ mm}$  程度である。

この結果からどちらのモデルでも実験誤差を考慮すると仮定が可能であるが、実験 2 の結果から反射成分と考えられる側面の光垂直分布は入射面とスクリーンに近いエッジのみにピークが生じるだけであることより、モデル 1 の 2 次波の波源のすなわちスクリーンに近い境界が有力であると考えられる。

強度的に考えてみると入射端で生じた境界回折波が側面を伝搬する際、点光源としてよりもむしろ光源に幅が生じるため、干渉縞の明暗の差に厚みの効果が現れてくると考えられる。

### § 6 . まとめと今後の仮題

今までの実験の経験より回折端の仕上り精度がこの種の回折像に敏感に現れてくるところから側面の影響すなわち 3 次元的効果は無視することはできない。今回の実験からも分るように回折像に対する遮光物体の 3 次元的効果は特に遮光体の幾何光学的陰影部分に生じるパターン、すなわち境界回折波の相互干渉によって生じるパターンの強度的な変化にその効果が特に現れている。

今回の実験では定性的な計測であったが厚みによる強度変化、パターン間隔への効果を定量的に計測することにより無接触で厚みを計測するシステムへの応用が考えられる。

また、回折現象を電磁氣的に取扱い有限要素法をもちいて計算し境界値問題として扱うことにより境界回折波の側面伝搬のメカニズムおよび境界回折波の波源の性質を解き明することが可能であると考えられる。

#### 謝 辞

本研究をまとめるにあたり御指導、頂いた本学電気工学科伊藤博教授に感謝いたします。  
また実験データ計測にあたり協力頂いた本研究室卒研究生 芦沢 晃君に感謝します。

#### 参考文献

- 1) H. Ito and N. Kanai, J. J. A. P. vol. 27, n0. 3, 1988, pp. L426
- 2) たとえば、  
M. Born and E. Wolf, Principles of Optics (Pergamon Press, 1987),  
6th ed, Chap. 8.
- 3) Ref (2) Chap. 11
- 4) K. Miyamoto and E. Wolf, J. Opt. Soc. Amer., 52 (1962) p. 615, p. 626.
- 5) たとえば、吉原邦夫著 物理光学 共立出版社 昭和53年 第3章 § 4.

(平成3年12月19日受理)