

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05227

研究課題名(和文)ピンホールを並べた導波路の開発

研究課題名(英文)Guiding waves with pinhole array

研究代表者

森永 実(Morinaga, Makoto)

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・准教授

研究者番号：60230140

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：同一の開口を持つ不透明なマスクを等間隔に多数直線上に並べた構造を導波路として用いる可能性について実験的・理論的に調べた。単位長さ当たりの伝搬損失はマスクの間隔の平方根に比例することが明らかとなった。従ってマスクの間隔を狭く配置することにより損失を数字上はいくらでも下げることが可能である。平方根という依存性は実用上は効率がよいとは言えないが、従来の導波路が必要とする高透明材料や高反射率材料が存在しない特殊な波長の電磁波や原子波への応用が考えられる。

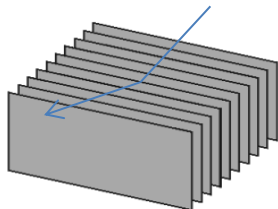
研究成果の概要(英文)：We have studied the possibility of using pinhole/slit array as a waveguide. In this structure, opaque pinholes/slits are aligned on a straight line with equal spacing. It is shown that the loss per unit length is proportional to square root of the spacing of the pinholes/slits. Though this dependence is not quite efficient in practice, such structure can be used to guide light of special wavelength or matter wave for which transparent material or material with high reflectivity is not available.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：導波路 回折 原子波

### 1. 研究開始当初の背景

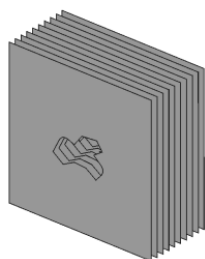
通信波長帯では極限までの低損失が実現されている光ファイバーであるが、一方例えば炭酸ガスレーザーの波長域などでは適当な透明材料がなく使いやすい導波路が存在しない。また近年研究が進む原子光学の分野において原子波のガイドはレーザー光による双極子力を用いるものや磁気ポテンシャルを用いるものがあるが制限はより厳しい。



他方で量子反射の研究から完全吸収体のシートを等間隔で並べた端面に原子波を浅い角度で入射すると高い反射率が得られることが実験的にわかってきていた。この効果を用いれば波の種類・波長等にあまり制限されることのない導波路が実現できるのではないかと考えるに至った。

### 2. 研究の目的

同一開口を持つ不透明なマスクを等間隔で多数直線上に並べた構造内の波の伝搬特性を調べ、このような構造物の導波路としての利用の可能性を探る。



この構造は適当な透明材料または高反射率材料が存在しない特殊な波長の光、また電磁波以外の波にも適用できる汎用性の高いものであり導波路としての利用の道が拓ければ応用も期待される。

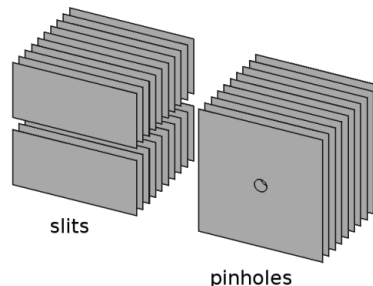
また一見すると導波路にはまったく向かない構造であるため過去においてもこの方向を迫る研究はなされてこなかったため、このような構造物の中の波の少々意外な振る舞いを明らかにすることは純粋に理学的にも興味があるところである。

### 3. 研究の方法

実験的にはピンホール列を使い、理論的解析にはより計算が容易なスリット列を主に対象とした。

実験装置は 10 枚程度の規模のものは各ピンホールに位置の微調機構のついた装置を構築し、より大きな規模 (100 ピンホール程度) のものは、ピンホールを調整なしで高精度に直線状に並べる製作方法を考案し作製した。理論面では比較的計算が容易な連続吸収体

モデル (研究成果の欄で解説) を用いピンホール列とスリット列の解析を行ない、同モデルでは決定できないパラメータはスリット列による回折の直接計算を行ない決定した。

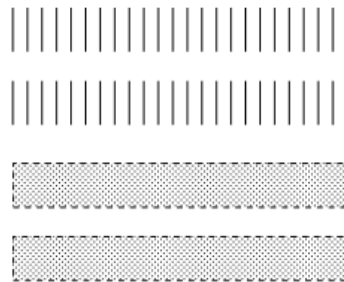


### 4. 研究成果

#### (1) 量子 Zeno 効果と連続吸収体モデル

放射性元素は半減期後およそ半数の原子が他の核種に崩壊している。しかしその間崩壊が起こっているか頻りに観測を行なうと崩壊は起こりにくくなる。このように観測することにより遷移が抑制される効果は (量子) Zeno 効果と呼ばれる。本研究が対象とする構造も Zeno 効果における観測を行なっていると解釈することができる。つまり光子は不透明マスクに差し掛かるたびにマスクによって開口内にあるか否かをチェックされると考える (マスクが開口を持った光検出器 (フォトダイオード等) であると考えたとわかりやすい)。なお一回の観測で遷移が検出される確率 (いまの場合光子がマスクに当たる確率) が観測の間隔  $\tau$  (マスクの間隔  $L$  に対応) に対して  $\tau \hat{a}$  の依存性を持つとすると一般に  $1 \leq a \leq 2$  となることが知られている (単位時間あたりの遷移率は  $\tau \hat{a}^{-1}$  に比例)。不透明マスク列では  $a=1.5$  であることが判明した。  $a=1$  の場合は観測の効果がまったくなく (Zeno 効果がない)  $a=2$  のとき効果が最大だから本研究で得られた  $a=1.5$  という結果は中程度の効果ということになる。

このように量子 Zeno 効果として解釈すると等間隔  $L$  で配置された不透明マスク (完全吸収体) を、開口と同じ断面を持ち  $L$  程度の吸収長を持つ連続吸収体に置き換えても波に対する効果はおおよそ同等であると考えることができる。このようにマスク列を連続吸収体に置き換えて解析を行なう手法を我々は連続吸収体モデルと呼んでいる。

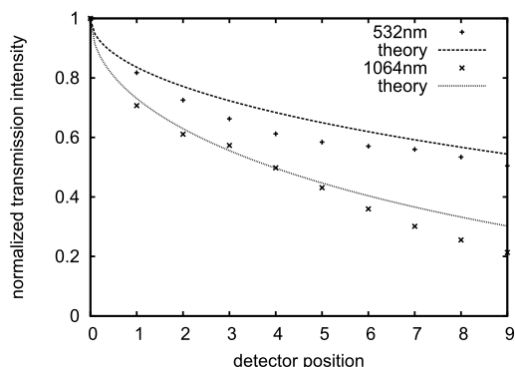


連続吸収体モデルによる解析は離散的なマ

スクによる回折を直接計算するより容易なためスリット列とピンホール列についての計算が実行できた。この構造体での伝搬過程は単一の無次元パラメータ  $\rho = \lambda L/d^2$  で特徴付けられる。ここで  $\lambda$  は波の波長、 $L$  はマスクの間隔、 $d$  はマスクの開口の大きさ（スリットではスリット幅、ピンホールでは直径を  $2d$  にとっている）である。例えばスリット/ピンホール1枚当たりの損失は  $\rho^{-1.5}$  に比例することが計算された。

(2) 不透明マスクによる回折の直接計算  
連続吸収体モデルでは伝搬損失等の特性は吸収体の  $(1/e)$  吸収長  $L_a$  に依存する。 $L_a$  はおおそマスクの間隔  $L$  に等しいと考えられるが正確な値はわからない。そこでその値を得る目的を含めマスクによる回折の直接計算がなんとか実行可能なスリット列について計算を実行した。その結果  $L_a = (2/9\pi)L$  としたとき連続吸収体モデルの結果と一致することがわかった。その係数は思っていたより少々小さい。

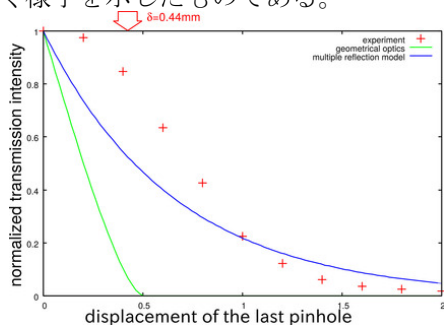
下のグラフは直径  $2d=0.5\text{mm}$  のピンホールを  $L=45\text{mm}$  間隔で 10 枚並べたものが光が透過するときの減衰の様子である。実験値がやや理論曲線を下回っているがピンホールの位置調整の誤差を考えるとこの傾向は妥当である。



### (3) 曲がり損失

導波路を曲げたときにどのくらいの損失が発生するか、またどのようなモード間の混合がおきるかは導波路の実用上の特性として重要である。

下図は先ほどと同じパラメータの構造体を緩やかに曲げた時に光の透過強度が下がっていく様子を示したものである。



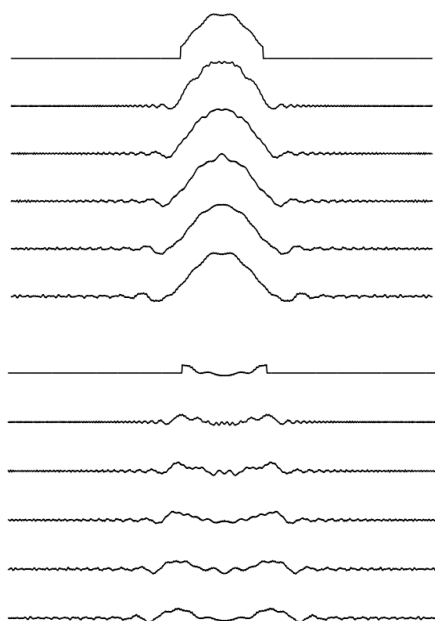
緑色の線は幾何光学的な理論曲線で、使用しているピンホールの径が  $0.5\text{mm}$  であることから出口側のピンホールの変位が  $0.5\text{mm}$  に達し

たところで出てくる光の値が 0 となる。一方実測値である赤色の十字はそれを超えてもただらだと光は出続ける。青色の線は幾何学的な内部反射の数と角度から損失を計算したものであるが曲げが小さな領域では実測値と傾向に質的な差が見られる。すなわち計算値はいずれも曲げに比例した損失が見られるのに対し実測値の損失のほうはその 2 乗に比例しているように見える。これは伝搬の横モードが離散的であることで説明することができる。曲げが小さいときは断熱追従がおき横モード間の遷移が抑制されるのだ。断熱追従が破綻する曲げの量を見積もると図の上の左のほうに示した矢印の辺りとなり実測値の傾向とも一致する。

### (4) 固有伝播モード

導波路の中の波の断面分布は一般に伝播過程で複雑に形を変える。しかし我々が扱う構造体は伝播方向にマスクの間隔  $L$  の周期をもつ周期構造であるから  $L$  だけ伝搬するごとに元の分布の形（振幅・位相は変化する）に戻るモードがありこれを固有伝播モードという。

下図は無次元パラメータ  $\rho = 0.16$  のときの最低次の伝播モードが一つのスリットを通過した直後から次のスリットの直前まで伝搬する様子を示したものである（波動関数の実部と虚部を表示）。



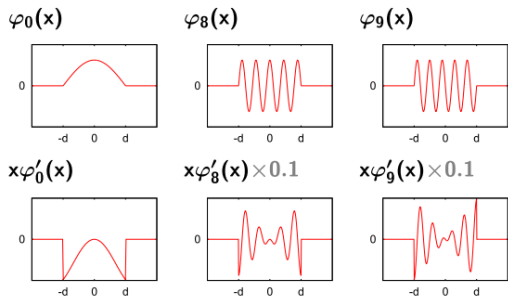
スリットを通った波は回折で広がりながら形も変えていくが、次のスリット直前では開口内部では再び同じ形に戻っていることが見て取れる。

任意の波の状態は固有伝播モードで展開できるから固有伝播モードの関数形等を得ることは重要であるが、それに加えてこの系の固有伝播モードを知ることには次のような意味がある。光は波であるから有限の径のビームは伝搬過程で必ず広がっていく。それを

回避するために昔から様々な「工夫」が試みられてきた。普通の光線の数学的モデルであるガウスビームに対して、エネルギーの分布が局在していないことを許すことの代わりに伝搬しても広がらないベッセルビームなどである（しかし実装上は広がらないのは限られた距離だけである）。本研究の固有モードが与えるのは出発地点では（開口内に）完全に局在していて、従って伝搬に伴いビームは広がるが設定された地点（次のスリットの位置）では元のビーム径内（＝開口内）においては元の形に戻っているというビームである。

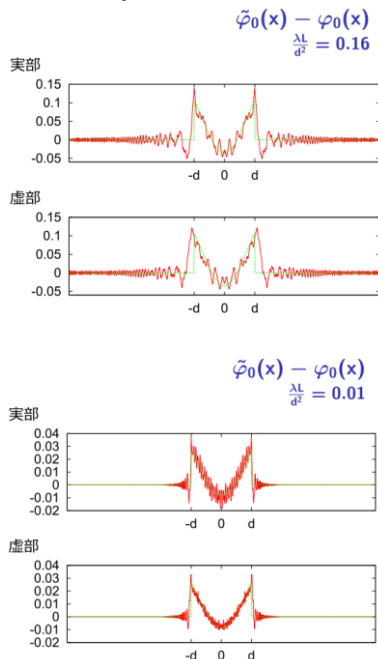
その関数形はスリット開口の場合

$$\tilde{\varphi}_m(x) = \varphi_m(x) - \frac{3}{4\pi} \sqrt{i\rho^{1/2}} \left[ x\varphi'_m(x) + \frac{1}{2}\varphi_m(x) \right]$$



となる。ただし無摂動の基底関数（マスクが無限に密であるときの固有モード）である  $\varphi_m(x)$  は正弦関数でスリットの端で 0 となり  $m$  個の節を持つもの、 $\rho$  は無次元パラメータである（ $\rho$  の最低次の項までを示してある）。これらはスリット列による回折の直接計算から得られた。

この結果の妥当性を検証するために無摂動の基底関数との差分を数値計算と比較したのが下図である。



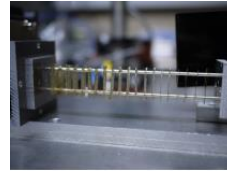
無次元パラメータ  $\rho = \lambda L/d^2$  の値が小さくなるに従って両者が近づいていく様子がわ

かる（縦軸のスケールに注意）。

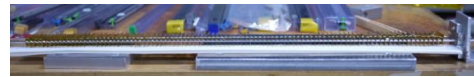
より複雑な形状の開口の場合の固有モード（有限距離の伝搬ののち同じ形に戻る波面の形）がどのような形をしているのかは興味ある問題であろう。

最後にこの構造を用いて試作してみた導波路の写真を載せておく。三号機は光を「曲げて」みせることができるようになっている。

一号機



二号機



三号機



## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① Makoto Morinaga, Ramachandrarao Yalla, Kohzo Hakuta, “Photon field in the presence of a nanofiber”, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 54, No. 7, 2015, 072001-1-072001-6

〔学会発表〕（計 3 件）

- ① Makoto Morinaga, “Guiding of Wave with Opaque Masks”, 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP 2018), 2018
- ② K. M. Shafi, W. Luo, R. R. Yalla, M. Morinaga, K. Hakuta, K. Iida, E. Tsutsumi, and A. Miyanaga, “Single Quantum Dots on an Optical Nanofiber at Cryogenic Temperature”, The Irago Conference 2017, 2017
- ③ 森永実, “ピンホール列による光のガイド IV”, 日本物理学会講演概要集, 2016 年秋季大会 2016

〔その他〕

ホームページ等

<http://m.ils.uec.ac.jp/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

森永 実 (MORINAGA, Makoto)

電気通信大学・レーザー新世代研究センタ

ー・准教授

研究者番号：60230140