

TR-O-0073

42

ビーム伝搬法によるステップ型光導波路の解析

大木 和美 稲垣 恵三

1994. 3. 31

ATR光電波通信研究所

あらまし

本テクニカルレポートは、ビーム伝搬法とそれを用いたステップ型光導波路の解析について述べている。光導波路のような波長に比べて緩やかではあるが任意の屈折率分布形状を有する媒質中の光波伝搬について、ビーム伝搬法は有効な解析手法として知られている。このビーム伝搬法に基づき、屈折率が階段状に変化するステップ型光導波路について、等価屈折率法によりY分岐のような平面回路中の光波伝搬を解析できるプログラムを作成した。まず解析の対象となる光導波路について簡単に解説した後、解析手法であるビーム伝搬法について説明し、スラブ導波路・Y分岐導波路の解析例を示している。付録として、プログラム使用法説明書、ソースプログラムを添付する。

目次

1. はじめに	1
2. 光導波路	1
2. 1 光集積回路	1
2. 2 光導波路	2
2. 3 スラブ光導波路	3
2. 3. 1 基本方程式	3
2. 3. 2 TE、TMモードの固有値方程式	4
2. 4 三次元光導波路	6
2. 4. 1 導波モード	6
2. 4. 2 等価屈折率法	7
3. ビーム伝搬法	8
3. 1 ビーム伝搬法の特徴	8
3. 2 BPMの基礎	8
3. 3 BPMによる導波路の解析	10
3. 3. 1 BPMの原理	10
3. 3. 2 BPM計算式の導出	11
3. 4 BPMの応用例	13
4. まとめ	13
謝辞	19
参考文献	19
付録	20
A. BPM program (プログラム使用説明書)	21
B. ソースプログラムリスト	23
B. 1 2次元導波路用BPM	23
B. 2 3次元導波路用BPM	33
B. 3 2次元グラフ描画プログラム	46
B. 4 3次元グラフ描画プログラム	48

1 はじめに

近年、世界は情報化社会となり、情報が自国だけでなく、世界中を伝わるようになってきている。そのため、地球の周りには人工的に製作された衛星が数多く回っている。しかし、地上から衛星まで電波(マイクロ波)を飛ばすためには直径が数十キロメートルという巨大なアンテナが必要となり、さらに、衛星と衛星の間で情報を交換する場合にはより巨大なアンテナが必要となる。一般に電波を遠くまで飛ばすためにはアンテナの開口径を大きくする、あるいは波長を短くすることが考えられるが、アンテナの開口径を大きくすることには限りがある。したがって、波長がマイクロメートルである光が注目される。光を使用する場合、アンテナなどの通信装置が小型、軽量化でき、さらに高速、大容量の通信路が期待できる。しかし、光の場合、ビームの拡がり角が非常に小さいため、高度の光ビーム制御が必要となる。

ところで、ビームを制御するために、波の回折を利用したフェーズドアレイアンテナがある。これは、アンテナを移動させてビームを受信側に向けるのではなく、アンテナを動かすことなく、位相の異なる波の回折を利用して受信側に向けるものである。この方法でよりゲインを高めるためには、波が出射する面の幅を狭くするのだが、光の場合、微妙に屈折率の異なる誘電体の中を伝搬するため、近付け過ぎると光が干渉し合い、うまく伝搬できない。そこで、どの程度まで近付けることができるかを解析する必要がある。このように、光が導波路中をどのように伝搬するかを解析する方法にビーム伝搬法がある。ビーム伝搬法は、導波路の伝搬モードと放射モードを一体化して取り扱うことができ、また伝搬方向に導波路形状が変化する場合の解析に優れている解析法である。

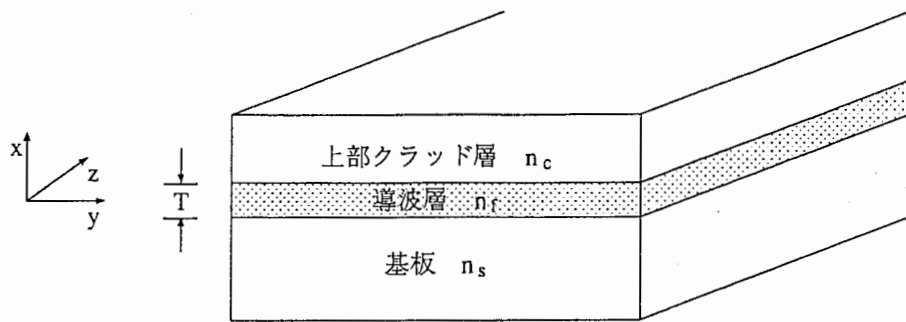
本実験ではビーム伝搬法を用い、最も基本的な導波路である二次元光導波路の解析を行った。第2節では光導波路の説明を行ない、第3節ではビーム伝搬法の説明と実際に解析した結果を示す。第4節でまとめを行なう。

2 光導波路 [1],[2]

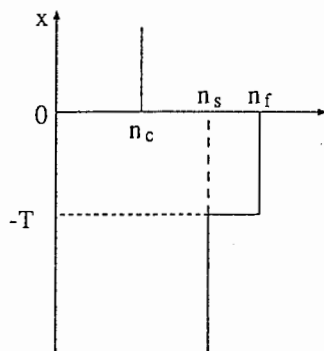
2.1 光集積回路

光集積回路とは、一つの基板の表面に屈折率がわずかに高い部分を作って光導波路とし、これを基本にして光源であるレーザーダイオード、および機能素子であるスイッチ、変調器など、ならびに光検出素子であるダイオードを集積化することによって、全体としてある機能を持たせるようにした光回路である。集積化によって光学系の小型軽量化、安定化、高性能化をはかることを目的としたものである。

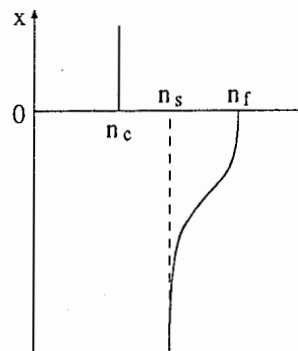
しかし、光集積回路はまだ完成品がないため、電子集積回路からの連想で早呑み込みされやすい。例えば、光集積回路は電子集積回路中の線路を光線路で置き換えたものであり、光信号の伝搬速度の方が電気信号の伝搬速度よりも速いことから、電子回路よりも光回路を使う方が信号処理速度がより速く、したがって非常に有利であるという考えもある。しかし、実際問題として、例えば電子集積回路中の電子パルスの伝搬速度に比べ、ガラス導波路中の光パルスの伝搬速度は数倍程度速いに過ぎない。したがって、数倍の処理



(a) 基本的な光導波路の構造



(b) ステップ形



(b) グレーテッド形

図 1: 基本的な光導波路

速度のためだけに電子回路をそれと同じ構成の光回路で置き換えてもあまり意味がないと思われる。光集積回路が真にその特徴を発揮できるのは、光パルスのようなエネルギー形態としてではなく、電子にはなくて光が持っている特徴である波動（特に波面）の形態として信号処理をするような光回路を構成した場合である。

2.2 光導波路

光集積回路を構成する上で基本となるものが光導波路である。光導波路はガラスに代表されるような透明な誘電体基板の表面に、これよりわずかに屈折率が高く、厚みが光波長オーダーの薄膜を付着させることによって光をこの高屈折率薄膜層内に閉じ込め、導波させることができる。最も簡単で基本的な光導波路の構造を図1に示す。ここで、基板、導波層および上部クラッド層の屈折率はそれぞれ n_s, n_f, n_c である。上部クラッド層は空気である場合が多く、このとき $n_c = 1$ である。光を導波させるためには $n_f > n_s > n_c$ で、かつ導波層の厚さはある一定値以上でなければならない。図1(a)の構造では光は x 方向にのみ閉じ込められるのでこれを二次元光導波路または、スラブ光導波路と呼ぶ。さらに、 x 方向の屈折率分布からみて、(1) 導波層内の屈折率が一定で x 方向に屈折率が階段状に変化するステップ形導波路(図1(b))と、(2) 導波層の屈折率が徐々に変化するグレーテッ

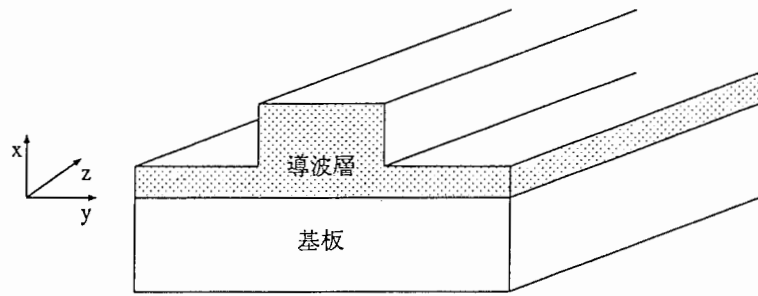


図 2: リッジ形光導波路

ド形導波路 (図 1(c)) に分けられる。

二次元光導波路の場合には、厚み方向 (x 方向) にのみ光が閉じ込められるので、導波された光は表面 (y 方向) に沿って自由伝搬となり、回折によって拡がってしまう。しかし、実際に光導波を利用した光変調器やスイッチを構成する時には、 y 方向にも光を閉じ込め、光波の分岐、曲がり、結合などを制御しなければならない。このように x と y 方向ともに光を閉じ込めたものを三次元光導波路という。三次元光導波路の例としてリッジ形光導波路を図 2 に示す。

次節では光導波路の基礎を修得するため、スラブ光導波路について説明する。

2.3 スラブ光導波路

2.3.1 基本方程式

等方性で無損失な誘電体媒質内の Maxwell の方程式は、

$$\nabla \times \tilde{\mathbf{E}} = -\mu_0 \frac{\partial \tilde{\mathbf{H}}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \tilde{\mathbf{H}} = \epsilon_0 n^2 \frac{\partial \tilde{\mathbf{E}}}{\partial t} \quad (2)$$

であり、 ϵ_0, μ_0 はそれぞれ真空中の誘電率と透磁率で、 n は屈折率である。

ここで、次式で表されるような平面波の伝搬を考える。

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{E}} &= \mathbf{E}(x, y) \exp j(\omega t - \beta z) \\ \tilde{\mathbf{H}} &= \mathbf{H}(x, y) \exp j(\omega t - \beta z) \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 ω は光の角周波数、 β は伝搬定数である。図 3 のようなスラブ光導波路では電界 \mathbf{E} 、磁界 \mathbf{H} の y 軸方向依存性はないから、 $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} = 0, \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y} = 0$ とおける。この関係を式 (1), (2) に代入すると、二つの独立な電磁界モードが得られ、それぞれ TE モード、TM モードと呼ばれる。

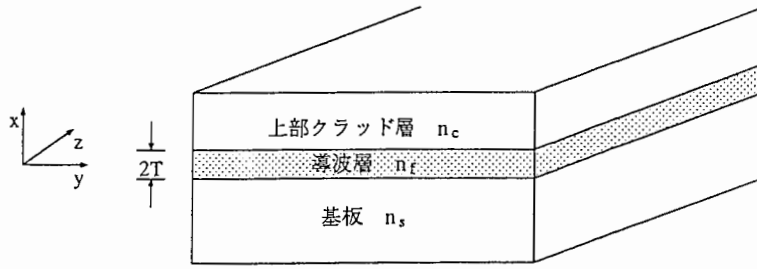


図 3: スラブ光導波路

TE モードは、以下の波動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (k_0^2 n^2 - \beta^2) E_y &= 0 \\ H_x &= -\frac{\beta}{\omega \mu_0} E_y \\ H_z &= -\frac{1}{j\omega \mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial x} \end{aligned} \quad (4)$$

を満たす。このモードにおいては、電界の z 方向成分がなく、電界ベクトルは z 軸に垂直な断面方向を向いているので、Transverse Electric モード、すなわち TE モードと呼ばれる。

次に TM モードは以下の波動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + (k_0^2 n^2 - \beta^2) H_y &= 0 \\ E_x &= \frac{\beta}{\omega \epsilon_0 n^2} H_y \\ E_z &= \frac{1}{j\omega \epsilon_0 n^2} \frac{\partial H_y}{\partial x} \end{aligned} \quad (5)$$

を満たす。このモードにおいては、磁界の z 成分がなく、磁界ベクトルは z 軸に垂直な断面方向を向いているので、Transverse Magnetic モード、すなわち TM モードと呼ばれる。

2.3.2 TE、TM モードの固有値方程式

TE モードおよび TM モードの伝搬定数や電磁界分布はそれぞれ式 (4),(5) を解くことによって与えられる。まず、図 4 に示した屈折率のスラブ光導波路の TE モードの固有値方程式や、電磁界分布を示す。導波層の中心を $x = 0$ とし、式 (4) を解くと、

$$E_y = \begin{cases} A \cos(\kappa T - \phi) \exp[-\sigma(x - T)] & (x > T) \\ A \cos(\kappa x - \phi) & (-T \leq x \leq T) \\ A \cos(\kappa T + \phi) \exp[\xi(x + T)] & (x < -T) \end{cases} \quad (6)$$

となる。ここで、 κ, σ および ξ はそれぞれ導波層、上部クラッド層、基板中の横方向波数であり、次式で与えられる。

$$\begin{cases} \kappa = \sqrt{k_0^2 n_f^2 - \beta^2} \\ \sigma = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_c^2} \\ \xi = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_s^2} \end{cases} \quad (7)$$

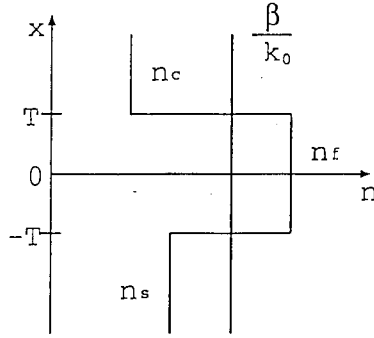


図 4: スラブ光導波路の屈折率分布

式(6)で表される E_y は、媒質の境界 ($x = \pm T$) で連続となるようにとられているため、連続条件としては H_z の境界条件のみを考えれば良い。この条件より TE モードの固有値方程式

$$\kappa T = \frac{m\pi}{2} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\xi}{\kappa} \right) + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\sigma}{\kappa} \right) \quad (8)$$

が得られる。ここで、 m はモード番号で $m = 0, 1, 2, \dots$ である。

ところで、図 4 あるいは式(6),(7) から分かるように光が導波層に閉じ込められて伝搬するためには、 κ は実数でなければならない。すなわち

$$n_s \leq \frac{\beta}{k_0} \leq n_f$$

でなければならないことが分かる。 $\frac{\beta}{k_0}$ は無次元の量であり、平面波の場合には屈折率そのものとなるので、光導波路解析においては

$$N = \frac{\beta}{k_0} \quad (9)$$

とおき、これを等価屈折率と呼ぶ。 $N < n_s$ の場合には、クラッド中の電磁界の横方向変化が正弦波的になり、クラッド側に光が逃げ出す状態になる。したがって、 $\beta = k_0 n_s$ は、導波モードが遮断されて非導波モード (放射モード) に移る境目を表すので遮断条件、あるいはカットオフ条件と呼ばれる。

式(8)の数値解を直接求めることによって具体的な導波モードの伝搬特性が得られるが、さらに式(8)を規格化表示し、すべてのスラブ光導波路に適用できる分散曲線を描くことができる。固有値方程式を規格化表示するために規格化周波数 V と規格化導波路屈折率 b を次のように定義する。

$$V = k_0 T \sqrt{n_f^2 - n_s^2} \quad (10)$$

$$b = \frac{N^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (11)$$

また、導波路の非対称性の尺度として

$$\gamma = \frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (12)$$

を定義する。 $n_s = n_c$ で $\gamma = 0$ であり、これはある媒質中に高屈折率導波層が埋め込まれた形の対称導波路に相当する。これに対して、一般には $n_s \neq n_c$ であるが、これを非対称導波路という。式(10),(11),(12)を用いて、式(8)を書き直すと

$$2V\sqrt{1-b} = m\pi + \tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{b}{1-b}}\right) + \tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{b+\gamma}{1-b}}\right) \quad (13)$$

となる。

一方、TMモードの固有値方程式は、式(5)を基本としてTEモードと同様の手順で求められる。式(5)を解くと H_y は、

$$H_y = \begin{cases} A \cos(\kappa T - \phi) \exp[-\sigma(x - T)] & (x > T) \\ A \cos(\kappa x - \phi) & (-T \leq x \leq T) \\ A \cos(\kappa T + \phi) \exp[\xi(x + T)] & (x < -T) \end{cases} \quad (14)$$

となり、 E_y が $x = \pm T$ で連続という境界条件より次の固有値方程式が得られる。

$$\kappa T = \frac{m\pi}{2} + \frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{n_f^2 \xi}{n_s^2 \kappa}\right) + \frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{n_f^2 \sigma}{n_c^2 \kappa}\right) \quad (15)$$

式(15)は、規格化周波数 V 、および規格化導波路屈折率 b を用いて書き直すと

$$2V\sqrt{1-b} = m\pi + \tan^{-1}\left(\frac{n_f^2}{n_s^2} \sqrt{\frac{b}{1-b}}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{n_f^2}{n_c^2} \sqrt{\frac{b+\gamma}{1-b}}\right) \quad (16)$$

と表される。

2.4 三次元光導波路

2.4.1 導波モード

金属で囲まれたマイクロ波導波管では、導波モードを純粋な形でTEとTMモードに分離することができる。これに対して、わずかに屈折率の異なった誘電体で構成される三次元光導波路の場合は、純粋なTEとTMモードは存在せずに混成モードとなる。そこで、電界の主成分がどの座標軸に平行であるかによってモードを分けている。 E_x を主成分とするモードを E_{pq}^x モード、 E_y を主成分とするモードを E_{pq}^y モードと呼び、各モードは x 方向と y 方向のモード番号 p, q の組み合わせによって規定される。ただし、整数 p, q は、二次元導波路の場合と異なり、三次元導波路の場合には0を含めず、 $p, q = 1, 2, 3, \dots$ とし、 p, q がそれぞれ主電界の x, y 方向分布に現れる極値の総数に対応するようにしている。

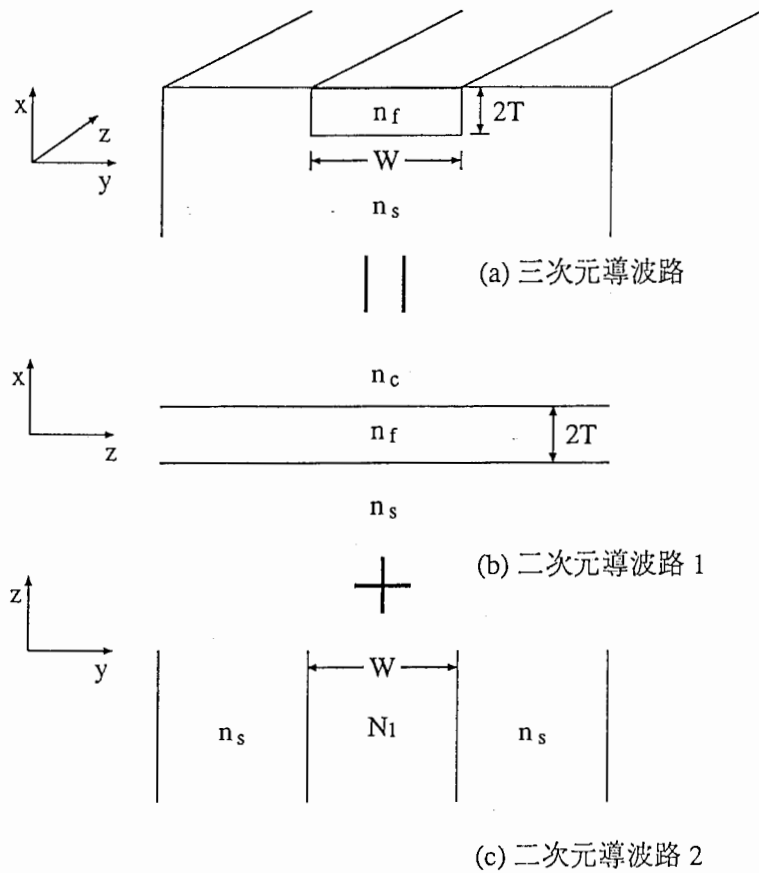


図 5: 等価屈折率法の等価モデル

したがって、三次元光導波路の厳密な解析は困難であり、いくつかの近似解析法が用いられている。この中で、導波路の横幅と厚さの比が1より大きく、カットオフから十分離れた導波モードに対しては、Marcatiliの方法と等価屈折率法がしばしば用いられる。次節で等価屈折率法を説明する。これらの方法は共に簡便であり、しかも強く閉じ込められた導波モードについては精度の良い近似解を与えてくれる。

2.4.2 等価屈折率法

等価屈折率法では、式(9)の導波モードの等価屈折率法を導入して三次元光導波路の近似解析を行なうことができる。図5の例はステップ形屈折率分布をもつ埋め込み形光導波路であり、 $(n_f - n_s) \ll 1$ とする。等価屈折率法では、この埋め込み形導波路を x 方向にのみ光波の閉じ込めがある二次元導波路1と、 y 方向にのみ光波の閉じ込めがある二次元導波路2に分けて考える。

ここでは、 E_x と H_y を主成分とする E_{pq}^x モードを例にあげて説明する。導波路1では、 E_x, H_y, E_z の電磁界成分をもつTMモードを取り扱うことになるので、モード番号 p が与えられれば、式(15)の固有値方程式から導波モードの等価屈折率 N_1 が求められる。次に y 方向に光波の閉じ込めがある導波路2を考える時、導波モードは等価屈折率 N_1 を導波

層の屈折率として感ずる。したがって、導波層の屈折率 N_1 でクラッド層の屈折率が n_s の対称導波路を考えれば良い。この場合は、 E_x, H_y, H_z の電磁界成分を持つ TE モードを扱うことになり、モード番号 q が与えられれば式 (8) の固有値方程式から三次元導波路の導波モードの伝搬定数 $\beta (= k_0 N)$ を求めることができる。

3 ビーム伝搬法 [2],[3]

3.1 ビーム伝搬法の特徴

光集積回路や光回路素子の分野における基本的な課題の一つに任意の屈折率分布を持つ光回路の中を光がどのように伝搬するかという問題がある。この問題については、古くから多くの研究者によりさまざまな解析法が提案されてきた。その中の一つに Feit と Fleck によって提案されたビーム伝搬法 (Beam Propagation Method : 以下 BPM) がある。

BPM は、伝搬と直角な方向への電磁界成分の離散的フーリエ変換と伝搬方向へ微小区間ごとに逐次的に計算を進める巧妙な演算法を特徴としている。この方法は、光の波長に比べて変化の緩い三次元または二次元の屈折率分布を持ち、かつ本質的に導波路形であるような光回路の中を伝搬する光波の数値解析に向いている。また、適当な条件の下では導波路の伝搬モードと放射モードを一体化して取り扱うことができ、またモードの偏波状態の解析にも優れている。

BPM においては光の伝搬距離の微小区間 Δz を考え、その前後の波動場を関係付ける計算を繰り返し行なっていく。そして、その一段落ごとにフーリエ変換とその逆変換が行なわれる。また計算の性質上、 Δz をむやみに大きくとることはできず、高々1波長程度までである。したがって一般に、計算の手順は単純であるが、繰り返しのステップ数はかなり大きくなり、BPM は長距離伝送路の波動解析には向いていないことが分かる。

以下、BPM の基本的概念を二次元光導波路を例にとって説明する。三次元光導波路の問題に対しては、等価屈折率法を用いて三次元導波構造を等価的なスラブ導波路に置き換えて解析すれば良い。

3.2 BPM の基礎

三次元のスカラー波動方程式

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + k_0^2 n^2(x, y, z) E = 0 \quad (17)$$

において、電界 E を波動の時間依存性 $\exp(j\omega t)$ を省略し、

$$E(x, y, z) = \phi(x, y, z) \exp(-jk_0 n_0 z) \quad (18)$$

と表す。ここで n_0 はある基準の屈折率であるが、一般に誘電体基板の屈折率とする。式 (18) を式 (17) に代入すると、波動方程式は次のようになる。

$$\nabla^2 \phi - j2k_0 n_0 \frac{\partial \phi}{\partial z} + k_0^2 (n^2 - n_0^2) \phi = 0 \quad (19)$$

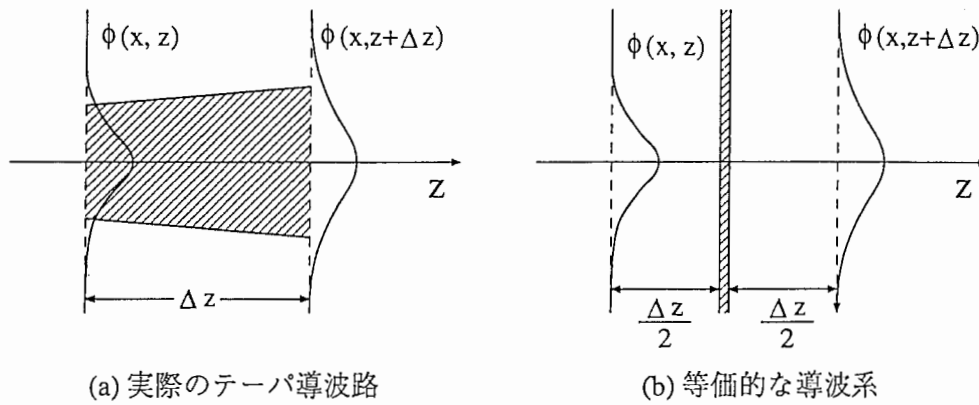


図 6: ビーム伝搬法の概念図

ただし、

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

である。屈折率の変化量が小さいとして $(n^2 - n_0^2) \simeq 2n_0(n - n_0)$ と置き、式 (19) を整理すると

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -j \frac{1}{2k_0 n_0} \nabla^2 \phi - j k_0 (n - n_0) \phi \quad (20)$$

となる。 $n = n_0$ の時には上式の右辺は、第 1 項のみとなることから分かるように、右辺第 1 項は屈折率が n_0 の自由空間における光の伝搬を表している。また、右辺第 2 項は屈折率が n_0 と異なるという導波構造の影響を表している。式 (20) の右辺の二つの効果は、光の伝搬に対して同時に作用するわけであるが、BPM においては波長オーダーの微少距離 Δz において自由空間伝搬の効果と導波構造の影響が分離して解析できると仮定する。

これをテーパ状スラブ導波路の場合について模式的に示したのが図 6 である。図 6(a) は実際のテーパ導波路の微少区間 Δz における光伝搬の様子を示している。同図 (b) は、BPM において自由空間伝搬の効果と導波構造の影響を分離して扱う様子を示す。まず、電界 $\phi(x, z)$ を距離 $\frac{\Delta z}{2}$ にわたって自由空間伝搬させ、次に図 (a) の斜線部分 (導波路部分) 全体に相当する位相変化量を微少区間の中間で考慮し、最後に再び距離 $\frac{\Delta z}{2}$ にわたって自由空間伝搬させることにより電界 $\phi(x, z + \Delta z)$ を求めるわけである。BPM の定式化は微少区間 Δz の前後の電界分布を関係付ける式を導出することであり、これを多数回繰り返すことによって多様な光回路における光伝搬を解析することができる。

3.3 BPM による導波路の解析

3.3.1 BPM の原理

スラブ導波路における光伝搬を考える。スラブ導波路の場合には式 (20) は次のように表される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -j \frac{1}{2k_0 n_0} \nabla^2 \phi - \alpha \phi - jk_0 [n(x, z) - n_0] \phi \quad (21)$$

ただし、

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

であり、一般化するために損失 (あるいは利得) を表す項 $-\alpha \phi$ を付加した。

式 (21) の右辺第 1 項の自由空間における光の伝搬を表す項をオペレータ A 、第 2, 3 項の導波構造の影響を表す項をオペレータ B とすると、式 (21) は次のように書き表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial z} &= (A + B) \phi & (22) \\ A &= -j \frac{1}{2k_0 n_0} \nabla^2 \\ B &= -\alpha(x, z) - jk_0 [n(x, z) - n_0] \end{aligned}$$

いま、 A, B の依存性がないとして式 (22) の形式的な解を求めると、

$$\phi(x, z + \Delta z) = \exp[\Delta z(A + B)] \phi(x, z) \quad (23)$$

となる。ここで、非可換のオペレータ \hat{a}, \hat{b} に対する Baker-Hausdorff の定理

$$\exp(\hat{a}) \exp(\hat{b}) = \exp\left(\hat{a} + \hat{b} + \frac{1}{2} [\hat{a}, \hat{b}] + \frac{1}{12} [\hat{a} - \hat{b}, [\hat{a}, \hat{b}]] + \dots\right)$$

を参考にし、微少区間の長さ Δz を十分小さくとり、 $O(\Delta z^2)$ 以上の微少量を無視できるとすると、

$$\exp(\Delta z A + \Delta z B) \simeq \exp\left(\frac{\Delta z}{2} A\right) \exp(\Delta z B) \exp\left(\frac{\Delta z}{2} A\right) \quad (24)$$

と近似できる。式 (24) を式 (23) に代入すると、

$$\phi(x, z + \Delta z) = \exp\left(\frac{\Delta z}{2} A\right) \exp(\Delta z B) \exp\left(\frac{\Delta z}{2} A\right) \phi(x, z) \quad (25)$$

と表される。式 (25) は図 6(b) に示すように電界 $\phi(x, z)$ を距離 $\frac{\Delta z}{2}$ にわたって自由空間伝搬させ、次に図 6(b) の斜線部分に相当する位相変化量を微少区間の中間で考慮し、最後に再び距離 $\frac{\Delta z}{2}$ にわたって自由空間伝搬させることにより電界 $\phi(x, z + \Delta z)$ を求める操作を表している。

3.3.2 BPM 計算式の導出

まず、式 (22) あるいは式 (25) のオペレータ A は自由空間における光の伝搬を表すものであり、式 (17) に立ち返ると、対応するスラブ導波路 ($\frac{\partial}{\partial y} = 0$) の波動方程式は、

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k_0^2 n_0^2 \psi = 0 \quad (26)$$

である。ただし、自由空間の電界を区別するため、 ψ と置く。式 (26) の解を以下のようにして求める。まず、 ψ をフーリエ積分を用いて

$$\psi(x, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(\rho, z) \exp(j2\pi\rho x) d\rho \quad (27)$$

と表す。ここで $\Psi(\rho, z)$ は空間周波数が ρ の平面波成分の振幅係数である。式 (27) を式 (26) に代入して、 $\Psi(\rho, z)$ に対する微分方程式を求めると

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \beta^2 \Psi(\rho, z) = 0 \quad (28)$$

となる。ただし、

$$\beta^2 = k_0^2 n_0^2 - (2\pi\rho)^2$$

である。また、 $z = z_0$ での電界分布が既知であり、 $\psi(x, z_0)$ であるとし、 $\Psi(\rho, z_0)$ を $\psi(x, z_0)$ の振幅係数とすると、

$$\begin{aligned} \Psi(\rho, z_0) &= F[\psi(x, z_0)] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x, z_0) \exp(-j2\pi\rho x) dx \end{aligned} \quad (29)$$

で与えられる。ただし、 $F[\]$ はフーリエ変換を表す。式 (29) を用いると式 (28) の解は

$$\Psi(\rho, z) = \Psi(\rho, z_0) \exp(-j\beta(z - z_0)) \quad (30)$$

となる。したがって、式 (30) を式 (27) に代入するとスラブの波動方程式 (26) の解は、

$$\begin{aligned} \psi(x, z) &= F^{-1}[\Psi(\rho, z)] \\ &= F^{-1}[\Psi(\rho, z_0) \exp(-j\beta(z - z_0))] \\ &= F^{-1}[F[\psi(x, z_0)] \exp(-j\beta(z - z_0))] \end{aligned} \quad (31)$$

と表される。ただし、ここで $F^{-1}[\]$ は式 (27) で表されるようなフーリエ逆変換を示す。上式が $z = z_0$ で $\psi(x, z_0)$ なる分布の電界を距離 $(z - z_0)$ にわたって自由空間伝搬させた場合の電界分布 $\psi(x, z)$ を求める関係式である。

次に、図 6 に示すように $z = z$ で $\phi(x, z)$ なる分布の電界を距離 $\frac{\Delta z}{2}$ にわたって自由空間伝搬させた場合の電界分布 $\phi(x, z + \frac{\Delta z}{2})$ は、式 (31) を用いると

$$\phi\left(x, z + \frac{\Delta z}{2}\right) = F^{-1}\left[\exp\left(-j\beta\frac{\Delta z}{2}\right) F[\phi(x, z)]\right] \quad (32)$$

と表される。ここで、 \exp の肩の位相変化量のうちで共通位相変化分 $\exp(-jk_0 n_0 \frac{\Delta z}{2})$ を $\exp(-j\beta \frac{\Delta z}{2})$ に足し引きしてフーリエ変換操作の外に出すと上式は次のようになる。

$$\phi\left(x, z + \frac{\Delta z}{2}\right) = \exp\left(-jk_0 n_0 \frac{\Delta z}{2}\right) F^{-1}\left[\exp\left(-j\delta\beta \frac{\Delta z}{2}\right) F[\phi(x, z)]\right] \quad (33)$$

ただし、ここで

$$\begin{aligned} \delta\beta &= \beta - k_0 n_0 \\ &= \sqrt{k_0^2 n_0^2 - (2\pi\rho)^2} - k_0 n_0 \end{aligned}$$

である。式(25)と式(33)を比較するとオペレータ $\exp\left(\frac{\Delta z}{2} \mathbf{A}\right)$ は、

$$\begin{aligned} \phi\left(x, z + \frac{\Delta z}{2}\right) &= \exp\left(\frac{\Delta z}{2} \mathbf{A}\right) \phi(x, z) \\ &= \exp\left(-jk_0 n_0 \frac{\Delta z}{2}\right) F^{-1}\left[\exp\left(-j\delta\beta \frac{\Delta z}{2}\right) F[\phi(x, z)]\right] \end{aligned} \quad (34)$$

という演算を表していることが分かる。

次に、オペレータ B の意味について考える。式(22)においてオペレータ B のみについて考えると

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z} = B\Theta \quad (35)$$

であるから、その解は

$$\Theta(x, z + \Delta z) = \Theta(x, z) \exp\left(\int_z^{z+\Delta z} B d\zeta\right) \quad (36)$$

で与えられる。区間 Δz の距離が微小である場合には、上式の積分は次のように近似することができる。

$$\int_z^{z+\Delta z} B d\zeta \simeq \frac{\Delta z}{2} [B(z) + B(z + \Delta z)]$$

以上から、式(25)におけるオペレータ $\exp(\Delta z B)$ は、

$$\exp(\Delta z B) = \exp\left(\frac{\Delta z}{2} \{B(z) + B(z + \Delta z)\}\right) \quad (37)$$

という演算を表していることが分かる。 B はスカラー量であるから、オペレータ $\exp(\Delta z B)$ の具体的な操作は、電界に式(37)右辺の位相補正項を付加することである。

式(34),(37)で表されるオペレータ A 、および B の意味するところを理解すると式(25)の $\phi(x, z + \Delta z)$ は次のように求められることが分かる。

(1) 前半の距離 $\frac{\Delta z}{2}$ にわたる自由空間伝搬

$$\begin{aligned} \phi\left(x, z + \frac{\Delta z}{2}\right) &= \exp\left(\frac{\Delta z}{2} \mathbf{A}\right) \phi(x, z) \\ &= \exp\left(-jk_0 n_0 \frac{\Delta z}{2}\right) F^{-1}\left[\exp\left(-j\delta\beta \frac{\Delta z}{2}\right) F[\phi(x, z)]\right] \end{aligned} \quad (38)$$

(2) 位相補正

$$\begin{aligned}\phi^* \left(x, z + \frac{\Delta z}{2} \right) &= \exp(\Delta z B) \phi \left(x, z + \frac{\Delta z}{2} \right) \\ &= \exp \left(\frac{\Delta z}{2} \{ B(z) + B(z + \Delta z) \} \right) \phi \left(x, z + \frac{\Delta z}{2} \right)\end{aligned}\quad (39)$$

(3) 後半の距離 $\frac{\Delta z}{2}$ にわたる自由空間伝搬

$$\begin{aligned}\phi(x, z + \Delta z) &= \exp \left(\frac{\Delta z}{2} A \right) \phi^* \left(x, z + \frac{\Delta z}{2} \right) \\ &= \exp \left(-jk_0 n_0 \frac{\Delta z}{2} \right) F^{-1} \left[\exp \left(-j\delta\beta \frac{\Delta z}{2} \right) F \left[\phi^* \left(x, z + \frac{\Delta z}{2} \right) \right] \right]\end{aligned}\quad (40)$$

3.4 BPM の応用例

BPM は、 $z = z_0$ での電界分布を初期値として与え、それが伝搬する様子を計算するものである。したがって BPM の計算を行なう前に $z = z_0$ での電界分布を求める必要がある。例えば、スラブ光導波路の場合、2.3 節で求めたように TE モードならば (6) 式、TM モードならば (14) 式を初期値として与える。

本実験では、FORTRAN でプログラムを作成し、CONVEX C240 で様々な光導波路を解析した。解析結果を図 7~10 に示す。また、各図で用いた屈折率や導波層の厚さなどの導波路パラメータを表 1 に示す。図 7,8 はモード番号 m がそれぞれ 0,1 のステップ形二次元光導波路中を光がまっすぐ進む様子を BPM で解析したものである。モードがマッチングしているため、光は放射せずに伝搬の様子が計算できている。

モードがマッチングしていない例として、初期値として与える電界分布にガウス分布を用いたものが図 9 である。この場合、導波路の伝搬モードにマッチングしている光だけがまっすぐに進み、マッチングしていない光は導波層の外へ放射されている。

次に、光集積回路を構成する上で重要となり、光の分岐を行なう分岐導波路を解析した例を図 10、導波路パラメータを表 2 に示す。この場合、等価屈折率法を用いて三次元導波路を二次元導波路に置き換えて解析を行なった。分岐角は約 3 度で、非常に小さいため、光は放射することなく分岐し、伝搬している。

4 まとめ

本実験では、無線通信システムで、光を用いたフェーズドアレイアンテナの構築のため必要となる光導波路の解析をビーム伝搬法を用いて行なった。BPM による光導波路の解析の例として、二次元光導波路と三次元光導波路について、実際に導波路パラメータを与え、光の伝搬をシミュレートした。今回解析した例からも分かるように、BPM は、導波路の伝搬モードと放射モードを同時に取り扱うことができ、また、伝搬方向に導波路の形状が変化する場合にも適用することができる。今後、導波路の屈折率が階段状に変化するステップ形光導波路だけでなく、徐々に変化するグレーテッド形光導波路も解析しなければならぬ。

表 1: 二次元光導波路のパラメータ

	図 1	図 2	図 3
導波層の厚さ $2T$ [μm]	4.0	4.0	4.0
光の波長 λ [μm]	1.3	1.3	1.3
導波層の屈折率 n_f	1.47	1.47	1.47
クラッドの屈折率 n_c	1.45	1.45	1.46
基板の屈折率 n_s	1.45	1.45	1.46
モード番号 m	0	1	\times

表 2: 三次元光導波路のパラメータ

導波層の厚さ $2T$ [μm]	4.0
導波路の幅 W [μm]	2.0
光の波長 λ [μm]	1.3
導波層の屈折率 n_f	3.38
クラッドの屈折率 n_c	1.0
基板の屈折率 n_s	3.17
モード番号 p	1
モード番号 q	1

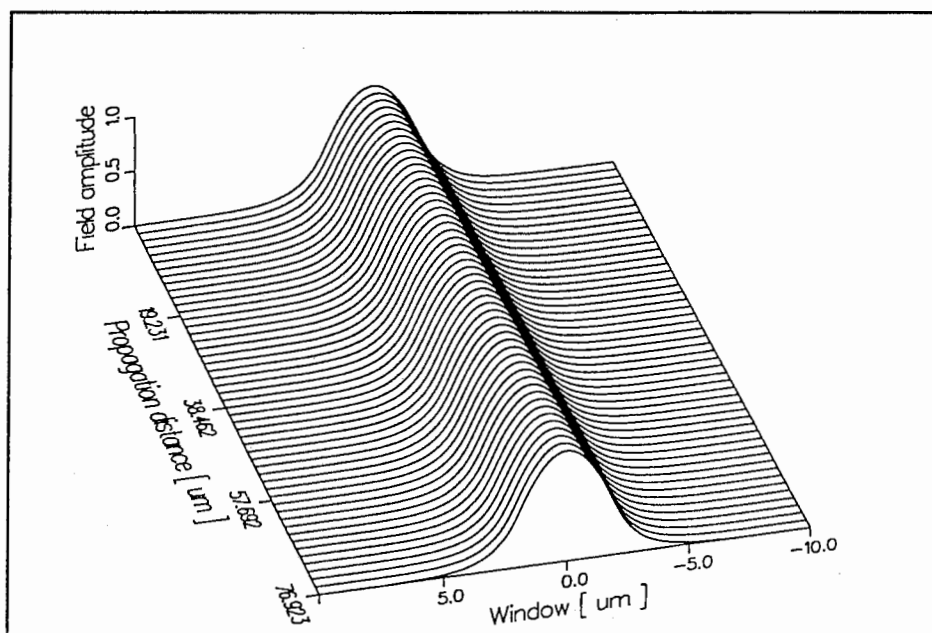


図 7: $m=0$ の時のスラブ光導波路の光の伝搬

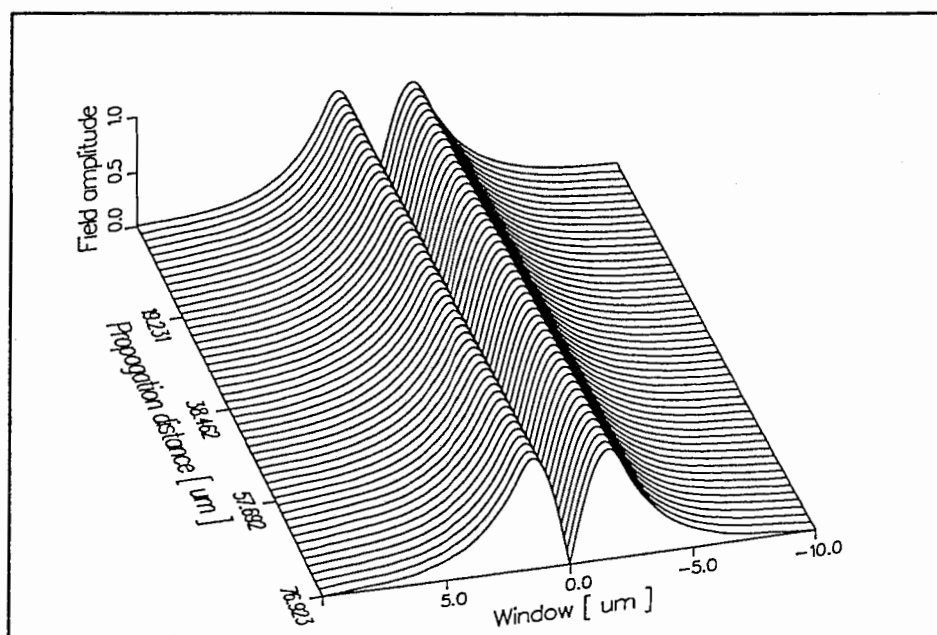


図 8: $m=1$ の時のスラブ光導波路の光の伝搬

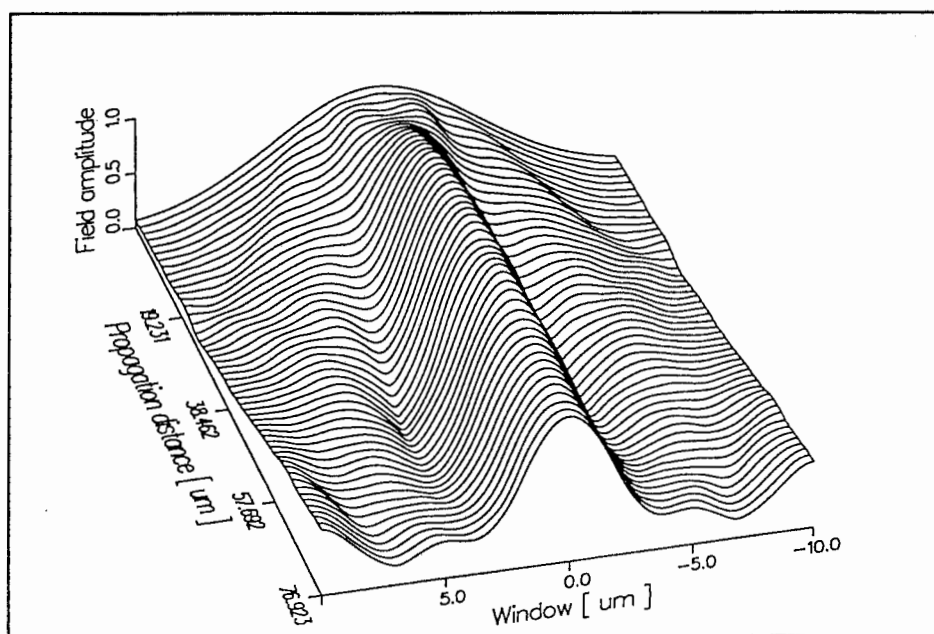


図 9: ガウス分布の電界分布を初期値とした場合

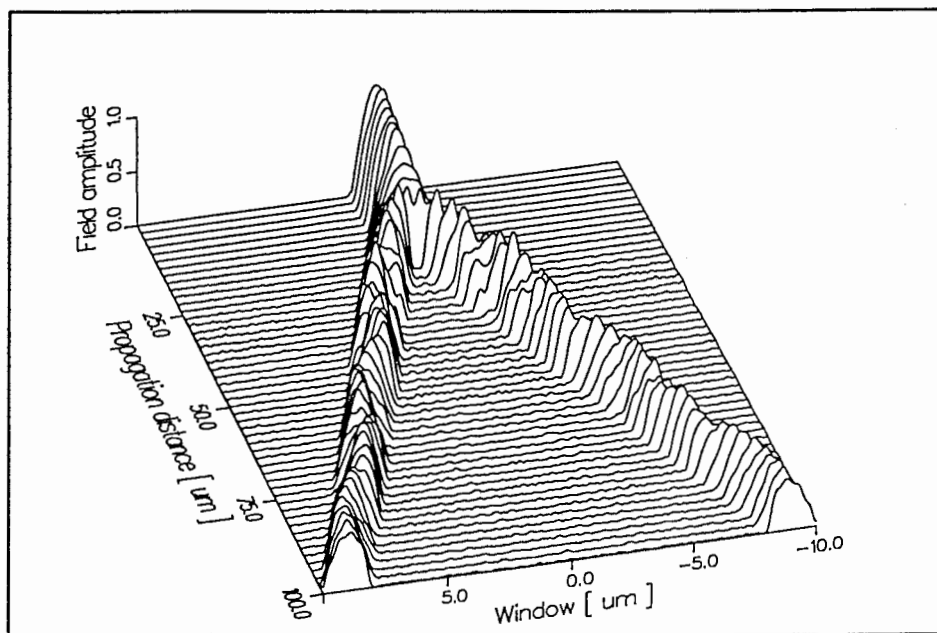


图 10: 分岐导波路

謝辞

本プログラムは、豊橋技術科学大学情報工学課程4年の大木和美が学部課程第4年次必修科目の「実務訓練」として1994年1月10日から1994年2月25日までATR光電波通信研究所無線通信第一研究室光ISLグループに滞在した際に作成した。

プログラム作成に当たり、無線通信第二研究室の馬場清一氏には、彼が作成したBPMプログラム[4]、[5]を参考にさせていただくとともに、いろいろとご指導・ご助言をいただきました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 西原浩、春名正光、栖原敏明：“光集積回路”、オーム社（1985）
- [2] 岡本勝就：“光導波路の基礎”、コロナ社（1992）
- [3] 山下栄吉監修：“電磁波問題の基礎解析法”、電子情報通信学会（1987）
- [4] Seichi Banba, Hiroyo Ogawa: "Novel Symmetrical Three-Branch Optical Waveguide with Equal Power Division", IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 2, No. 5 (May 1992)
- [5] 馬場清一：“ビーム伝搬法による分布屈折率型光導波路の解析”、ATRテクニカルレポート（準備中）

付録

A. BPM program (プログラム使用説明書)

B. ソースプログラムリスト

B. 1 2次元導波路用BPM

B. 2 3次元導波路用BPM

B. 3 2次元グラフ描画プログラム

B. 4 3次元グラフ描画プログラム

BPM program

大木和美

平成 6 年 2 月 25 日

1 プログラムの位置

二次元導波路 /convex/usr2/home/ogi/Bpm/Step2d

三次元導波路 /convex/usr2/home/ogi/Bpm/Step3d

DISSPLA でグラフを描くプログラム /rs04/usr2/home/ogi/Bpm/Graph

2 プログラムの説明

2.1 /ogi/Bpm/Step2d

bpm.f	メインプログラム
inputdata.f	与えたデータをファイル”bpm.dat” から読み込む
caldata.f	読み込んだデータから別のパラメータを計算する。
sourcegauss.f	最初に与える電界（ガウス分布）を計算する。
sourcewave.f	最初に与える電界（TE モード）を計算する。
eigen.f	規格化導波路屈折率を二分法で計算する。
propagation.f	自由空間伝搬させる。（BPM）
lenz.f	位相補正を行なう。（BPM）
datafile.f	計算したデータをファイル”data.dat” に落とす。

2.2 /ogi/Bpm/Step3d

	Step2d と同じものは省略
effect.f	等価屈折率を計算する
eigen__te.f	TE モードの場合の規格化導波路屈折率を二分法で計算する。
eigen__tm.f	TM モードの場合の規格化導波路屈折率を二分法で計算する。
lenz*.f	様々な形状の場合の位相補正を行なうプログラム

3 計算方法

3.1 ファイル”bpm.dat” に与えるデータ

1. 導波層の厚さ T
2. 導波路の幅 W （3次元の場合のみ）
3. 光の波長
4. 導波路の屈折率
5. クラッドの屈折率
6. 基板の屈折率
7. モード番号（2次元の場合 m 、3次元の場合 p ）

8. モード番号 q (3次元の場合のみ)
9. 微少伝搬距離 Δz
10. 導波路の長さ (全伝搬距離)
11. データをファイルに落とす間隔

この順番通りにファイルに書いてください。

3.2 ファイル”spot.dat” に与えるデータ

このデータは最初の電界分布としてガウス分布を与える時 (sourcegauss.f の計算) に使われます。スポットサイズを入れてください。

3.3 導波路の形状を変える場合

この場合はプログラムの中身を変えなければならないので少々面倒です。例えばテーパ導波路の場合、ファイル”lenz.f”のIF文の中身を変えます。導波路の中の時、DELTAにNF-NSを代入し、導波路の外はNC-NSを代入します。

/ogi/Bpm/Step3dのディレクトリの中の名前にlenzとついているのはlenz.fの様々な例です。参考になるかどうか分かりませんが、分からない場合は見てください。

4 グラフを描く

ファイル”data.dat”の一番始めに、グラフを描くためのパラメータを書き込むようにしています。データは、

1. 光の波長
2. 導波路の幅 (W ではない。)
3. x 方向分割数
4. 伝搬 (z) 方向分割数
5. 微少伝搬距離 Δz
6. データをファイルに落とした間隔

の順番で、”CALDATA”を行なっている時、ファイルに落とされます。

```

C
C      ビーム伝搬法   メイン プログラム "bpm.f"
C
C      T: 導波層の厚さ   LAMBDA: 光の波長   KO: 光の波数   M: モード番号
C      EY(): 電界   ITV: データのファイルにおとす間隔
C      NF: 導波層の屈折率   NC: クラッドの屈折率   NS: 基板の屈折率
C      ALLZ: 全伝搬距離   DELTAZ: 微小伝搬距離   NUMZ: 伝搬回数
C      ALLX: 導波路の厚さ   DELTAX: サンプルング間隔   NUMX: サンプルング点数
C      XSTART: 計算開始点
C
C      PROGRAM MAIN
C
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,K-Z)
C      INTEGER M, NUMX, NUMZ
C      PARAMETER (NUMX=256)
C      COMPLEX*16 EY(NUMX)
C
C      C 初期値の計算
C      CALL INPUTDATA(T, LAMBDA, NF, NC, NS, M,
C      &DELTAZ, ALLZ, ITV, ALLX)           !データ読み込み
C      OPEN(20, FILE='data.dat', ERR=80, STATUS='NEW') !出力ファイルの open
C      CALL CALDATA(KO, LAMBDA, XSTART, ALLX, DELTAX, NUMX,
C      &ALLZ, DELTAZ, NUMZ, ITV)         !データの計算
C      CALL SOURCEWAVE(T, KO, NF, NC, NS, M,
C      &DELTAX, XSTART, NUMX, EY)       !電界の界分布を求める
C
C      C 伝搬
C      Z=DELTAZ
C      DO 10 IZ=1, NUMZ
C      CALL PROPAGATION(KO, NS, EY, NUMX, DELTAX, DELTAZ) !deltaZ/2自由空間伝搬
C      CALL LENZ(KO, NF, NC, NS, EY, T, XSTART, DELTAX, NUMX, DELTAZ, Z) !位相補正
C      CALL PROPAGATION(KO, NS, EY, NUMX, DELTAX, DELTAZ) !deltaZ/2自由空間伝搬
C      CALL DATAFILE(EY, NUMX, ITV, IZ) !データをファイルにおとす
C      Z=Z+DELTAZ
C 10  CONTINUE
C
C      ENDFILE(20)
C      CLOSE(20, ERR=90, STATUS='KEEP') !出力ファイルの close
C      CALL SYSTEM('cp data.dat /usr2/home/ogi/Bpm/Step/Graph/.')
C      STOP
C
C      C ファイル openに失敗した時
C 80  WRITE(6,*) 'File "data.dat" exists.'
C      STOP
C
C      C ファイル closeに失敗した時
C 90  WRITE(6,*) 'File Close Error'
C      STOP
C
C      END

```

```

C
C   データをファイル "bpm.dat"から読み込むプログラム
C
      SUBROUTINE INPUTDATA(T,LAMBDA,NF,NC,NS,M,
&DELTAZ,ALLZ,ITV,ALLX)
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,K-Z)
      INTEGER M
C
C   データ読み込み
      OPEN(10,FILE='bpm.dat',STATUS='OLD')
      READ(10,*) T,LAMBDA,NF,NC,NS,M,DELTAZ,ALLZ,ITV,ALLX
      CLOSE(10,STATUS='KEEP')
C
C   読み込んだデータをディスプレイに表示
      WRITE(6,200) T
200  FORMAT(' ', 'Waveguide thickness = ',E10.3E2)
      WRITE(6,201) LAMBDA
201  FORMAT(' ', 'Wave length = ',E10.3E2)
      WRITE(6,202) NF,NC,NS
202  FORMAT(' ', 'Core, clad and substrate index = ',3E10.3E2)
      WRITE(6,203) M
203  FORMAT(' ', 'Mode number = ',I2)
      WRITE(6,204) DELTAZ,ALLZ
204  FORMAT(' ', 'Delta Z and Z length = ',2E10.3E2)
      WRITE(6,205) ITV
205  FORMAT(' ', I4, 'th Data output file.')
      WRITE(6,206) ALLX
206  FORMAT(' ', 'X length = ',E10.3E2)
C
      RETURN
      END

```

```

C
C   初期データの計算とファイル出力
C
C   SUBROUTINE CALDATA(KO,LAMBDA,XSTART,ALLX,DELTAX,NUMX,
&ALLZ,DELTAZ,NUMZ,ITV)
C
C   IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,K-Z)
C   INTEGER NUMX,NUMZ
C   PI=3.141592653589793
C
C   データの計算
C   KO=2.0*PI/LAMBDA
C   XSTART=-ALLX/2.0
C   DELTAX=ALLX/NUMX
C   NUMZ=IDINT(ALLZ/DELTAZ)
C
C   ファイル出力
C   WRITE(20,*) LAMBDA
C   WRITE(20,*) ALLX
C   WRITE(20,*) NUMX
C   WRITE(20,*) ALLZ
C   WRITE(20,*) DELTAZ
C   WRITE(20,*) ITV
C
C   RETURN
C   END

```

```

C
C 電界の界分布を求めるプログラム
C
SUBROUTINE SOURCEWAVE(T,KO,NF,NC,NS,M,DELTAX,XSTART,NUMX,EY)
C
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,K-Z)
INTEGER M,NUMX
REAL TEMP
COMPLEX*16 EY(NUMX)
PI=3.141592653589793
C
AA=T/2
V=KO*AA*DSQRT(NF**2-NS**2) !規格化周波数の計算
CALL EIGEN(V,M,B,NF,NC,NS) !規格化導波路屈折率を求める
IF (B.LT.2.0E-6) GO TO 99 !規格化導波路屈折率が求められなかった時
N=DSQRT(B*(NF**2-NS**2)+NS**2) !等価屈折率の計算
BETA=KO*N !伝搬定数の計算
C
C 各データをディスプレイに表示
WRITE(6,1000) V
1000 FORMAT(' ', 'Normalized frequency = ',E10.3E2)
WRITE(6,1001) B
1001 FORMAT(' ', 'Normalized guide index = ',E10.3E2)
WRITE(6,1002) N
1002 FORMAT(' ', 'Effective index = ',E10.3E2)
C
C 界分布の計算
CHI=KO*DSQRT(NF**2-N**2)
SIGMA=KO*DSQRT(N**2-NC**2)
XI=KO*DSQRT(N**2-NS**2)
C
PHI=M*PI/2+DATAN(XI/CHI)/2-DATAN(SIGMA/CHI)/2
C
X=XSTART
DO 100 I=1,NUMX
  IF(X.GT.AA) THEN !クラッド中
    EY(I)=DCOS(CHI*AA-PHI)*DEXP(-SIGMA*(X-AA))
  ELSE IF(X.LT.-AA) THEN !基板中
    EY(I)=DCOS(CHI*AA+PHI)*DEXP(XI*(X+AA))
  ELSE !導波層中
    EY(I)=DCOS(CHI*X-PHI)
  END IF
  X=X+DELTAX
100 CONTINUE
C
C 電界の振幅をファイルに出力
DO 200 I=1,NUMX
  TEMP=SNGL(CDABS(EY(I)))
  WRITE(20,*) TEMP
200 CONTINUE
C
C 求めた界分布をファイル "source.dat" に出力
C OPEN(90,FILE='source.dat',ERR=91,STATUS='NEW')
C DO 900 I=1,NUMX
C WRITE(90,*) I,REAL(EY(I))
C 900 CONTINUE
C CLOSE(90,STATUS='KEEP')
RETURN
C
C 91 WRITE(6,*) 'File "source.dat" exists.'
C STOP
C
C 規格化導波路屈折率が求められなかった時
99 WRITE(6,*) 'Mode number Error'
CLOSE(20,STATUS='DELETE')
STOP

```

C

END

```

C
C   スラブ光導波路の固有値を求めるためのプログラム（二分法）
C
C   SUBROUTINE EIGEN(V,M,B,NF,NC,NS)
C
C   IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,K-Z)
C   INTEGER M
C   PI=3.141592653589793
C
C 初期値の設定
C   EPS=1.0E-6
C   B1=EPS
C   B2=1.0-EPS
C   GAMMA=(NS**2.0-NC**2.0)/(NF**2.0-NS**2.0)
C   Y=2.0*V*DSQRT(1.0-B2)-DBLE(M)*PI
C   & -DATAN(DSQRT(B2/(1.0-B2)))-DATAN(DSQRT((B2+GAMMA)/(1.0-B2)))
C
C 計算
C 10  CONTINUE
C     BM=(B1+B2)/2
C     YY=2.0*V*DSQRT(1.0-BM)-DBLE(M)*PI
C     & -DATAN(DSQRT(BM/(1.0-BM)))-DATAN(DSQRT((BM+GAMMA)/(1.0-BM)))
C     IF(Y*YY .GT. 0) THEN
C       B2=BM
C     ELSE
C       B1=BM
C     END IF
C     IF(B2-B1 .GE. EPS) GO TO 10
C
C   B=BM
C
C   RETURN
C   END

```

```

C
C   ガウス分布の電界を求めるプログラム
C
C   SUBROUTINE SOURCEWAVE(T,KO,NF,NC,NS,M,DELTAX,XSTART,NUMX,EY)
C
C   IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,K-Z)
C   INTEGER M,NUMX
C   REAL TEMP
C   COMPLEX*16 EY(NUMX)
C   PI=3.14159265358979323846
C
C   データ (SPOT)の読み込み
C   OPEN(50,FILE='spot.dat',ERR=91,STATUS='OLD')
C   READ(50,*) SPOT
C   CLOSE(50,STATUS='KEEP')
C
C   界分布の計算
C   X=XSTART ! 50.0E-6
C   DO 101 I=1,NUMX
C       EY(I)=DEXP(-1.0*(X/SPOT)**2) ! 0.5
C       DUMMY=X/SPOT
C       WRITE(6,*) DUMMY
C       X=X+DELTAX
101  CONTINUE
C
C   電界の振幅をファイルに出力
C   DO 200 I=1,NUMX
C       TEMP=SNGL(CDABS(EY(I)))
C       WRITE(20,*) TEMP
200  CONTINUE
C
C   求めた界分布をファイル"source.dat"に出力
C   OPEN(90,FILE='source.dat',ERR=91,STATUS='NEW')
C   DO 900 I=1,NUMX
C       WRITE(90,*) I,REAL(EY(I))
C 900  CONTINUE
C   CLOSE(90,STATUS='KEEP')
C   RETURN
C
C 91  WRITE(6,*) 'File Open Error.'
C     STOP
C
C     END

```



```

C
C 自由空間伝搬をした後の電界を計算するプログラム
C
SUBROUTINE PROPAGATION(KO,NS,EY1,NUMX,DELTAX,DELTAZ)
C
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,K-Z)
INTEGER NUMX
COMPLEX*16 EY1(NUMX),EY2(1024),CTEMP
PI=3.141592653589793
C
CALL DFFTCF(NUMX,EY1,EY2)
C
DERHO=1/(NUMX*DELTAX)
DO 100 I=1,NUMX
  IF((I.GT.0).AND.(I.LE.NUMX/2)) THEN
    TEMP=2.0*PI*(I-1)*DERHO
  ELSE
    TEMP=2.0*PI*(I-1-NUMX)*DERHO
  END IF
  DUMMY=(KO*NS)**2-TEMP**2
  IF (DUMMY.GE.0.0) THEN
    DEBETA=DSQRT((KO*NS)**2-TEMP**2)-KO*NS
    CTEMP=-DEBETA*DELTAZ/2.0
    EY1(I)=CDEXP(CTEMP*(0.0,1.0))*EY2(I)
  ELSE
    EY1(I)=(0.0,0.0)
  END IF
100 CONTINUE
C
CALL DFFTCB(NUMX,EY1,EY2)
C
DO 101 I=1,NUMX
  EY2(I)=EY2(I)/CMPLX(NUMX)
  CTEMP=-KO*NS*DELTAZ/2.0
  EY1(I)=CDEXP(CTEMP*(0.0,1.0))*EY2(I)
101 CONTINUE
C
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE LENZ(KO,NF,NC,NS,EY,T,XSTART,DELTAX,NUMX,DELTAZ,Z)
C
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,K-Z)
INTEGER NUMX
COMPLEX*16 EY(NUMX),CTEMP
C
AA=T/2.0
X=XSTART
DO 100 I=1,NUMX
  IF((X.GT.-AA).AND.(X.LT.AA)) THEN
    DELTAN=NF-NS
  ELSE
    DELTAN=NC-NS
  END IF
  CTEMP=-KO*DELTAN*DELTAZ
  EY(I)=CDEXP(CTEMP*(0.0,1.0))*EY(I)
  X=X+DELTAX
100 CONTINUE
C
RETURN
END

```

```

C
C   データを ITV回 に 1回 ファイルにおとすプログラム
C
SUBROUTINE DATAFILE(EY, NUMX, ITV, IZ)
C
  IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, K-Z)
  INTEGER NUMX
  REAL TEMP
  COMPLEX*16 EY(NUMX)
C
  IF (MOD(IZ, ITV).EQ.0) THEN
  DO 100 I=1, NUMX
    TEMP=SNGL(CDABS(EY(I)))
    WRITE(20, *) TEMP
100 CONTINUE
  END IF
C
  RETURN
  END

```

```

C
C      ビーム伝搬法   メイン プログラム   "bpm.f"
C
C      T: 導波層の厚さ   W: 導波路の幅   LAMBDA: 光の波長   KO: 光の波数
C      P,Q: モード番号   EY(): 電界   ITV: データのファイルにおとす間隔
C      NF: 導波層の屈折率   NC: クラッドの屈折率   NS: 基板の屈折率
C      ALLZ: 全伝搬距離   DELTAZ: 微小伝搬距離   NUMZ: 伝搬回数
C      ALLX: 導波路の厚さ   DELTAX: サンプルング間隔   NUMX: サンプルング点数
C      XSTART: 計算開始点
C
C      PROGRAM MAIN
C
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,K-Z)
C      INTEGER P,Q,NUMX,NUMZ
C      PARAMETER (NUMX=256)
C      COMPLEX*16 EY(NUMX)
C
C      初期値の計算
C      CALL INPUTDATA(T,W,LAMBDA,NF,NC,NS,P,Q,
C      &DELTAZ,ALLZ,ITV,ALLX)           !データ読み込み
C      OPEN(20,FILE='data.dat',ERR=80,STATUS='NEW') !出力ファイルの open
C      CALL CALDATA(KO,LAMBDA,XSTART,ALLX,DELTAX,NUMX,
C      &ALLZ,DELTAX,NUMZ,ITV)         !データの計算
C      CALL SOURCEWAVE(T,W,KO,NF,NC,NS,P,Q,
C      &DELTAX,XSTART,NUMX,EY)       !電界の界分布を求める
C
C      伝搬
C      Z=DELTAX
C      DO 10 IZ=1,NUMZ
C      CALL PROPAGATION(KO,NS,EY,NUMX,DELTAX,DELTAX) !deltaZ/2自由空間伝搬
C      CALL LENZ(KO,NF,NC,NS,EY,W,XSTART,DELTAX,NUMX,DELTAX,Z) !位相補正
C      CALL PROPAGATION(KO,NS,EY,NUMX,DELTAX,DELTAX) !deltaZ/2自由空間伝搬
C      CALL DATAFILE(EY,NUMX,ITV,IZ) !データをファイルにおとす
C      Z=Z+DELTAX
C 10  CONTINUE
C
C      ENDFILE(20)
C      CLOSE(20,ERR=90,STATUS='KEEP') !出力ファイルの close
C      CALL SYSTEM('cp data.dat /usr2/home/ogi/Bpm/Step/Graph/.')
C      STOP
C
C      ファイル openに失敗した時
C 80  WRITE(6,*) 'File "data.dat" exists.'
C      STOP
C
C      ファイル closeに失敗した時
C 90  WRITE(6,*) 'File Close Error'
C      STOP
C
C      END

```

```

C
C   データをファイル "bpm.dat" から読み込むプログラム
C
      SUBROUTINE INPUTDATA(T,W,LAMBDA,NF,NC,NS,P,Q,
&DELTAZ,ALLZ,ITV,ALLX)
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,K-Z)
      INTEGER P,Q
C
C   データ読み込み
      OPEN(10,FILE='bpm.dat',STATUS='OLD')
      READ(10,*) T,W,LAMBDA,NF,NC,NS,P,Q,DELTAZ,ALLZ,ITV,ALLX
      CLOSE(10,STATUS='KEEP')
C
C   読み込んだデータをディスプレイに表示
      WRITE(6,200) T
200  FORMAT(' ', 'Waveguide thickness = ',E10.3E2)
      WRITE(6,207) W
207  FORMAT(' ', 'Waveguide width = ',E10.3E2)
      WRITE(6,201) LAMBDA
201  FORMAT(' ', 'Wave length = ',E10.3E2)
      WRITE(6,202) NF,NC,NS
202  FORMAT(' ', 'Core, clad and substrate index = ',3E10.3E2)
      WRITE(6,203) P,Q
203  FORMAT(' ', 'Mode number = ',2I2)
      WRITE(6,204) DELTAZ,ALLZ
204  FORMAT(' ', 'Delta Z and Z length = ',2E10.3E2)
      WRITE(6,205) ITV
205  FORMAT(' ', I4, 'th Data output file.')
      WRITE(6,206) ALLX
206  FORMAT(' ', 'X length = ',E10.3E2)
C
      RETURN
      END

```

```

C
C   初期データの計算とファイル出力
C
C   SUBROUTINE CALDATA(KO,LAMBDA,XSTART,ALLX,DELTAX,NUMX,
C   &ALLZ,DELTAZ,NUMZ,ITV)
C
C   IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,K-Z)
C   INTEGER NUMX,NUMZ
C   PI=3.141592653589793
C
C   データの計算
C   KO=2.0*PI/LAMBDA
C   XSTART=-ALLX/2.0
C   DELTAX=ALLX/NUMX
C   NUMZ=IDINT(ALLZ/DELTAZ)
C
C   ファイル出力
C   WRITE(20,*) LAMBDA
C   WRITE(20,*) ALLX
C   WRITE(20,*) NUMX
C   WRITE(20,*) ALLZ
C   WRITE(20,*) DELTAZ
C   WRITE(20,*) ITV
C
C   RETURN
C   END

```

```

C
C 電界の界分布を求めるプログラム
C
SUBROUTINE SOURCEWAVE(T,W,KO,NF,NC,NS,P,Q,DELTAX,XSTART,NUMX,EY)
C
  IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,K-Z)
  INTEGER P,Q,NUMX
  REAL TEMP
  COMPLEX*16 EY(NUMX)
  PI=3.141592653589793
C
C 等価屈折率の計算
  CALL EFFECT(T,W,KO,NF,NC,NS,P,Q,N)
C
C 界分布の計算
  AA=W/2.0
  CHI=KO*DSQRT(NF**2-N**2)
  SIGMA=KO*DSQRT(N**2-NC**2)
  XI=KO*DSQRT(N**2-NS**2)
C
  PHI=(P-1)*PI/2+DATAN(XI/CHI)/2-DATAN(SIGMA/CHI)/2
C
  X=XSTART
  DO 100 I=1,NUMX
    IF(X.GT.AA) THEN !クラッド中
      EY(I)=DCOS(CHI*AA-PHI)*DEXP(-SIGMA*(X-AA))
    ELSE IF(X.LT.-AA) THEN !基板中
      EY(I)=DCOS(CHI*AA+PHI)*DEXP(XI*(X+AA))
    ELSE !導波層中
      EY(I)=DCOS(CHI*X-PHI)
    END IF
    X=X+DELTAX
  100 CONTINUE
C
C 電界の振幅をファイルに出力
  DO 200 I=1,NUMX
    TEMP=SNGL(CDABS(EY(I)))
    WRITE(20,*) TEMP
  200 CONTINUE
C
C 求めた界分布をファイル"source.dat"に出力
  OPEN(90,FILE='source.dat',ERR=91,STATUS='NEW')
  DO 900 I=1,NUMX
    WRITE(90,*) I,REAL(EY(I))
  900 CONTINUE
  CLOSE(90,STATUS='KEEP')
  RETURN
C
C 91 WRITE(6,*) 'File "source.dat" exists.'
C STOP
C
END

```

```

C
C   等価屈折率を計算するプログラム
C
SUBROUTINE EFFECT(T,W,KO,NF,NC,NS,P,Q,N)
C
  IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,K-Z)
  INTEGER P,Q
  PI=3.141592653589793
C
C TMモードの等価屈折率の計算
  V=KO*(T/2)*DSQRT(NF**2-NS**2) !規格化周波数の計算
  CALL EIGEN_TM(V,P,B,NF,NC,NS) !規格化導波路屈折率を求める
  IF (B.LT.2.0E-6) GO TO 98 !規格化導波路屈折率が求められなかった時
  N1=DSQRT(B*(NF**2-NS**2)+NS**2) !等価屈折率の計算
C
C TEモードの等価屈折率の計算
  V=KO*W*DSQRT(N1**2-NS**2) !規格化周波数の計算
  CALL EIGEN_TE(V,Q,B) !規格化導波路屈折率を求める
  IF (B.LT.2.0E-6) GO TO 99 !規格化導波路屈折率が求められなかった時
  N=DSQRT(B*(N1**2-NS**2)+NS**2) !等価屈折率の計算
C
C 各データをディスプレイに表示
  WRITE(6,1000) V
1000  FORMAT(' ','Normalized frequency = ',E10.3E2)
  WRITE(6,1001) B
1001  FORMAT(' ','Normalized guide index = ',E10.3E2)
  WRITE(6,1002) N
1002  FORMAT(' ','Effective index = ',E10.3E2)
  RETURN
C
C 規格化導波路屈折率を求められなかった時のエラーメッセージ
98  WRITE(6,*) 'Mode Number P Error'
  CLOSE(20,STATUS='DELETE')
  STOP
99  WRITE(6,*) 'Mode Number Q Error'
  CLOSE(20,STATUS='DELETE')
  STOP
END

```



```

C
C   TMモードで規格化導波路屈折率を求めるプログラム (二分法)
C
C   SUBROUTINE EIGEN_TM(V,P,B,NF,NC,NS)
C
C   IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,K-Z)
C   INTEGER P
C   PI=3.141592653589793
C
C   初期値の設定
C   EPS=1.0E-6
C   B1=EPS
C   B2=1.0-EPS
C   GAMMA=(NS**2-NC**2)/(NF**2-NS**2)
C   Y=2.0*V*DSQRT(1.0-B2)-(DBLE(P)-1)*PI
C   & -DATAN(NF**2/NS**2*DSQRT(B2/(1.0-B2)))
C   & -DATAN(NF**2/NC**2*DSQRT((B2+GAMMA)/(1.0-B2)))
C
C   計算
C   10  CONTINUE
C       BM=(B1+B2)/2
C       YY=2.0*V*DSQRT(1.0-BM)-(DBLE(P)-1)*PI
C       & -DATAN(NF**2/NS**2*DSQRT(BM/(1.0-BM)))
C       & -DATAN(NF**2/NC**2*DSQRT((BM+GAMMA)/(1.0-BM)))
C       IF(Y*YY .GT. 0) THEN
C           B2=BM
C       ELSE
C           B1=BM
C       END IF
C       IF(B2-B1 .GE. EPS) GO TO 10
C
C   B=BM
C
C   RETURN
C   END

```

```

C
C   TEモードの規格化導波路屈折率を求めるプログラム (二分法)
C
C   SUBROUTINE EIGEN_TE(V,Q,B)
C
C   IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,K-Z)
C   INTEGER Q
C   PI=3.141592653589793
C
C   初期値の設定
C   EPS=1.0E-6
C   B1=EPS
C   B2=1.0-EPS
C   Y=V*DSQRT(1.0-B2)-DBLE(Q)*PI+2.0*DATAN(DSQRT((1.0-B2)/B2))
C
C   計算
C 10  CONTINUE
C     BM=(B1+B2)/2
C     YY=V*DSQRT(1.0-BM)-DBLE(Q)*PI+2.0*DATAN(DSQRT((1.0-BM)/BM))
C     IF(Y*YY .GT. 0) THEN
C       B2=BM
C     ELSE
C       B1=BM
C     END IF
C     IF(B2-B1 .GE. EPS) GO TO 10
C
C   B=BM
C
C   RETURN
C   END

```

```

C
C 自由空間伝搬をした後の電界を計算するプログラム
C
SUBROUTINE PROPAGATION(KO, NS, EY1, NUMX, DELTAX, DELTAZ)
C
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, K-Z)
INTEGER NUMX
COMPLEX*16 EY1(NUMX), EY2(1024), CTEMP
PI=3.141592653589793
C
CALL DFFTCF(NUMX, EY1, EY2)
C
DERHO=1/(NUMX*DELTAX)
DO 100 I=1, NUMX
  IF((I.GT.0).AND.(I.LE.NUMX/2)) THEN
    TEMP=2.0*PI*(I-1)*DERHO
  ELSE
    TEMP=2.0*PI*(I-1-NUMX)*DERHO
  END IF
  DUMMY=(KO*NS)**2-TEMP**2
  IF (DUMMY.GE.0.0) THEN
    DEBETA=DSQRT((KO*NS)**2-TEMP**2)-KO*NS
    CTEMP=-DEBETA*DELTAZ/2.0
    EY1(I)=CDEXP(CTEMP*(0.0,1.0))*EY2(I)
  ELSE
    EY1(I)=(0.0,0.0)
  END IF
100 CONTINUE
C
CALL DFFTCB(NUMX, EY1, EY2)
C
DO 101 I=1, NUMX
  EY2(I)=EY2(I)/CMPLX(NUMX)
  CTEMP=-KO*NS*DELTAZ/2.0
  EY1(I)=CDEXP(CTEMP*(0.0,1.0))*EY2(I)
101 CONTINUE
C
RETURN
END

```

```

C
C 位相補正をするプログラム
C
SUBROUTINE LENZ(KO,NF,NC,NS,EY,T,XSTART,DELTAX,NUMX,DELTAZ,Z)
C
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,K-Z)
INTEGER NUMX
COMPLEX*16 EY(NUMX),CTEMP
C
AA=T/2.0
X=XSTART
DO 100 I=1,NUMX
  IF((X.GT.-AA).AND.(X.LT.AA)) THEN      !導波路内
    DELTAN=NF-NS
  ELSE                                     !導波路外
    DELTAN=NC-NS
  END IF
  CTEMP=-KO*DELTAN*DELTAZ
  EY(I)=CDEXP(CTEMP*(0.0,1.0))*EY(I)
  X=X+DELTAX
100 CONTINUE
C
RETURN
END

```

```

C
C 分岐導波路の位相補正をするプログラム
C
SUBROUTINE LENZ(KO,NF,NC,NS,EY,A,XSTART,DELTAZ,NUMX,DELTAZ,Z)
C
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,K-Z)
INTEGER NUMX
COMPLEX*16 EY(NUMX),CTEMP
C
AA=A/2.0
PP=0.05          !傾き
QQ=10.0E-6      !始点
IF (Z.LT.QQ) THEN      !始点前
    XZ=AA
ELSE                  !始点後
    XZ=PP*(Z-QQ)+AA
END IF
X=XSTART
DO 100 I=1,NUMX
    IF((X.GT.XZ-A).AND.(X.LT.XZ)) THEN      !導波路内
        DELTAN=NF-NS
    ELSE IF((X.GT.-XZ).AND.(X.LT.-XZ+A)) THEN !導波路内
        DELTAN=NF-NS
    ELSE                                     !導波路外
        DELTAN=NC-NS
    END IF
    CTEMP=-KO*DELTAN*DELTAZ
    EY(I)=CDEXP(CTEMP*(0.0,1.0))*EY(I)
    X=X+DELTAZ
100 CONTINUE
C
RETURN
END

```

```

C
C   テーバ導波路の位相補正をするプログラム
C
SUBROUTINE LENZ(KO,NF,NC,NS,EY,T,XSTART,DELTAX,NUMX,DELTAZ,Z)
C
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,K-Z)
INTEGER NUMX
COMPLEX*16 EY(NUMX),CTEMP
C
AA=T/2.0
X=XSTART
PP=-0.01           !傾き
QQ=10.0E-6        !始点
DO 100 I=1,NUMX
  IF (Z.LT.QQ) THEN      !始点前
    XZ=AA
  ELSE                   !始点后
    XZ=PP*(Z-QQ)+AA
  END IF
  IF ((X.GT.-XZ).AND.(X.LT.XZ)) THEN      !導波路内
    DELTAN=NF-NS
  ELSE                                     !導波路外
    DELTAN=NC-NS
  END IF
  CTEMP=-KO*DELTAN*DELTAZ
  EY(I)=CDEXP(CTEMP*(0.0,1.0))*EY(I)
  X=X+DELTAX
100 CONTINUE
C
RETURN
END

```

```

C
C 折れ曲がり導波路の位相補正をするプログラム
C
SUBROUTINE LENZ(KO,NF,NC,NS,EY,T,XSTART,DELTAZ,NUMX,DELTAZ,Z)
C
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,K-Z)
INTEGER NUMX
COMPLEX*16 EY(NUMX),CTEMP
C
AA=T/2.0
PP=0.1           !傾き
QQ=10.0E-6      !始点
IF (Z.LT.QQ) THEN      !始点前
    XZ=AA
ELSE                   !始点後
    XZ=PP*(Z-QQ)+AA
END IF
X=XSTART
DO 100 I=1,NUMX
    IF((X.GT.XZ-T).AND.(X.LT.XZ)) THEN      !導波路内
        DELTAN=NF-NS
    ELSE                                     !導波路外
        DELTAN=NC-NS
    END IF
    CTEMP=-KO*DELTAN*DELTAZ
    EY(I)=CDEXP(CTEMP*(0.0,1.0))*EY(I)
    X=X+DELTAZ
100 CONTINUE
C
RETURN
END

```

```

C
C   データを ITV回 に 1回 ファイルにおとすプログラム
C
C   SUBROUTINE DATAFILE(EY,NUMX,ITV,IZ)
C
C   IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,K-Z)
C   INTEGER NUMX
C   REAL TEMP
C   COMPLEX*16 EY(NUMX)
C
C   IF (MOD(IZ,ITV).EQ.0) THEN
C   DO 100 I=1,NUMX
C     TEMP=SNGL(CDABS(EY(I)))
C     WRITE(20,*) TEMP
100 CONTINUE
C   END IF
C
C   RETURN
C   END

```



```

PROGRAM GRAPH2D
C
IMPLICIT INTEGER(I-N), REAL(A-H,O-Z)
REAL LAMBDA
PARAMETER (IAA=256,IBB=101)
REAL XDAT(IAA),YDAT(IAA,IBB)
C
C
* Read parameters (BPM profile)
OPEN (50, ERR=900,FILE='data.dat',STATUS="OLD")
REWIND(50)
READ(50,*) LAMBDA
READ(50,*) ALLX
READ(50,*) NUMX
READ(50,*) ALLZ
READ(50,*) DELTAZ
READ(50,*) ITV
WRITE(6,*) LAMBDA,ALLX,NUMX,ALLZ,DELTAZ,ITV
C
ALLX=ALLX*1.0E6
XMIN=-ALLX/2.0
XMAX=ALLX/2.0
XSTEP=(XMAX-XMIN)/NUMX
NUMY=INT(ALLZ/(DELTAZ*ITV))+1
YMIN=0.0
YMAX=ALLZ/LAMBDA
WRITE(6,*) XMIN,XMAX,XSTEP,NUMY,YMIN,YMAX
C
X=XMIN
DO I= 1,NUMX
  XDAT(I)=X
  X=X+XSTEP
ENDDO
C
DO J=1,NUMY
  DO I= 1,NUMX
    READ(50,*) DUMMY
    YDAT(I,J)=DUMMY*5+(J-1)*REAL(ITV)*DELTAZ/LAMBDA
  ENDDO
  WRITE(6,*) J,YDAT(1,J)
ENDDO
C
CLOSE(50,ERR=901)
C
C
*** Draw a graph
CALL DEVTAKESUN(0)
CALL PAGE (8.0, 12.0)
CALL AREA2D(6.0, 9.0)
CALL FRAME
C
C
* Axes etc.
XINC= (XMAX-XMIN)/4.
YINC=YMAX
CALL HEIGHT(0.25)
CALL SIMPLX
CALL XNAME('Window [ um ]',100)
CALL YNAME('Propagation distance [ ramuda ]',100)
CALL GRAF( XMIN,XINC,XMAX, YMIN,5.0,YMAX+10)
C
C
*** Draw a curve
DO J=0,NUMY-1
  CALL CURVE(XDAT,YDAT(I,J),NUMX,0)
ENDDO
CALL ENDPL(0)
CALL DONEPL
STOP
C

```

```
900 WRITE(6,*) 'File Open Error'  
STOP  
901 WRITE(6,*) 'File Close Error'  
STOP
```

C

```
END
```

```

PROGRAM GRAPH3D
C
IMPLICIT INTEGER(I-N), REAL(A-H,O-Z)
REAL LAMBDA
PARAMETER (IAA=256,IBB=101)          ! maximum number of data points
REAL GRDAT(IAA,IBB)

C
* Read graph parameters
OPEN (20, FILE='graph3d.dat', STATUS="OLD")
READ (20,*) WBOXLX,WBOXLY,WBOXLZ
READ (20,*) VPHI,VTHETA,VRADI
READ (20,*) ZMIN,ZMAX
CLOSE(20)

C
* Read parameters (BPM profile)
OPEN (50, FILE='data.dat', STATUS="OLD")
READ(50,*) LAMBDA
READ(50,*) ALLX
READ(50,*) NUMX
READ(50,*) ALLZ
READ(50,*) DELTAZ
READ(50,*) ITV
WRITE(6,*) LAMBDA,ALLX,NUMX,ALLZ,DELTAZ,ITV

C
ALLX=ALLX*1.0E6
XMIN=-ALLX/2.0
XMAX=ALLX/2.0
XSTEP=(XMAX-XMIN)/NUMX
NUMY=INT(ALLZ/(DELTAZ*ITV))+1
YMIN=0.0
YMAX=100.0      !ALLZ/LAMBDA
WRITE(6,*) XMIN,XMAX,XSTEP,NUMY,YMIN,YMAX

C
DO J= 1,NUMY
  DO I= 1,NUMX
    READ(50,*) GRDAT(I,J)
  ENDDO
ENDDO
CLOSE(50)

C
*** Draw a graph
CALL DEVTAKESUN(0)
CALL PAGE (11., 9.0)
CALL AREA2D(9.0, 6.0)
CALL HEIGHT(0.2)
CALL SIMPLX
CALL FRAME

C
** Text
CALL VOLM3D(WBOXLX,WBOXLY,WBOXLZ)
CALL VUANGL(VPHI,VTHETA,VRADI)

C
* Axes etc.
XINC= (XMAX-XMIN)/4.
YINC= (YMAX-YMIN)/4.
ZINC= (ZMAX-ZMIN)/2.
CALL X3NAME('Window [ um ]',100)
CALL Y3NAME('Propagation distance [ um ]',100)
CALL Z3NAME('Field amplitude',15)
CALL GRAF3D( XMIN,XINC,XMAX, YMIN,YINC,YMAX, ZMIN,ZINC,ZMAX )
C
CALL BOX3D

C
*** Draw a surface
CALL SURVIS('TOP')
CALL SURSZE(XMIN,XMAX,YMIN,YMAX)
CALL SURMAT(GRDAT,NUMX-1,NUMX,1,NUMY,0)

```

```
CALL ENDPL(0)  
CALL DONEPL  
STOP  
END
```