

ビーム伝搬解析シミュレータ使用マニュアル

目次

| | | |
|----------|------------------------------|----------|
| 1 | シミュレータの概要 | 1 |
| 1.1 | 解析の流れ | 1 |
| 2 | 前処理プログラム | 1 |
| 2.1 | システムの起動 | 1 |
| 2.2 | 解析領域の設定 | 2 |
| 2.3 | 導波路形状の入力 | 3 |
| 2.4 | 入射条件と材料パラメータの設定 | 5 |
| 2.4.1 | 入射条件 (Input Condition) | 5 |
| 2.4.2 | 材料パラメータ (Material Parameter) | 5 |
| 2.5 | BPM パラメータの設定 | 6 |
| 2.6 | オプション | 6 |
| 2.6.1 | スケールファクターの設定 | 7 |
| 2.6.2 | グリッドの ON/OFF | 7 |
| 2.6.3 | 導波路の 3 次元表示 | 8 |
| 2.6.4 | 導波路の yz 断面表示 | 8 |
| 3 | 解析実行 | 8 |
| 3.1 | 2次元解析 | 9 |
| 3.2 | 2次元ベクトル波解析 | 9 |
| 3.3 | 3次元スカラー波解析 | 9 |
| 3.4 | 3次元セミベクトル波解析 | 9 |
| 3.5 | 3次元フルベクトル波解析 | 9 |
| 4 | 後処理プログラム | 9 |
| 4.1 | 2次元解析結果の可視化 | 9 |
| 4.2 | 3次元解析結果の可視化 | 11 |

1 シミュレータの概要

本シミュレータは、伝搬方向に大きな屈折率不連続がないような、後方への反射波の影響を無視できる光導波路中の光波の伝搬を解析する。解析にはビーム伝搬法 (Beam Propagation Method : BPM) が用いられ、横方向の界の離散化に高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform : FFT) を用いた FFT-BPM, 有限差分法 (Finite Difference Method : FDM) を用いた FD-BPM, 有限要素法 (Finite Element Method : FEM) を用いた FE-BPM の3種類の解析実行プログラムをサポートし、2次元、3次元の光導波路を解析することができる。

1.1 解析の流れ

以下に光導波路解析と結果の可視化の手順を示す。

1. 前処理

- (a) 解析領域の設定
- (b) 導波路形状の入力
- (c) BPM 解析パラメータの設定

2. 解析実行

- (a) ビーム伝搬解析
- (b) 出力パワーの計算

3. 後処理

- (a) 数値計算結果の可視化

2 前処理プログラム

2.1 システムの起動

シミュレータの起動は

```
# bpm_cad &
```

により行う。図1に本シミュレータの起動画面を示す。ウィンドウ上部にあるメニューバーには、左からファイル入

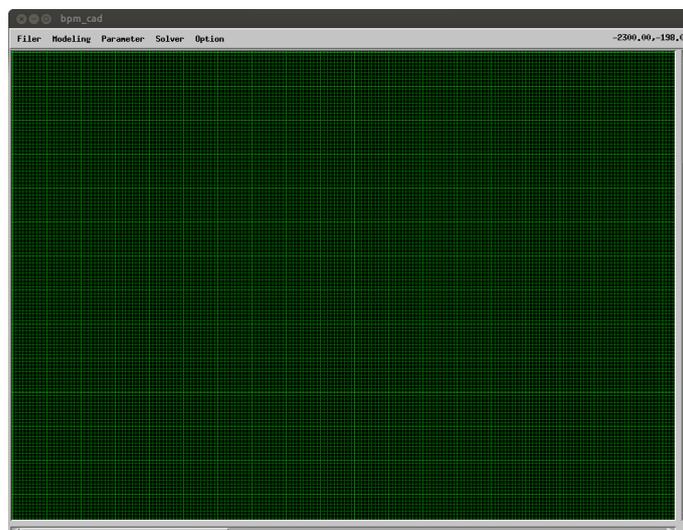


図 1: ビーム伝搬解析シミュレータの初期画面

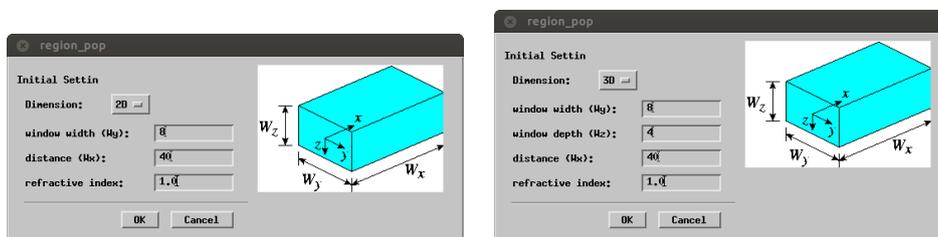
出力 (Filer), 解析領域の設定と導波路形状の入力 (Modeling), 導波路パラメータ入力と入射条件設定 (Parameger), BPM 解析パラメータと解析実行 (Solver), その他 (Option) のコマンドが用意されている。表 1 にメニューから実行できるコマンドをまとめる。

表 1: メニューバーのコマンド一覧

| カテゴリー | コマンド | 説明 |
|-----------|--------------|-------------------------------------|
| Filer | Open | 保存されている導波路形状とパラメータを読み込む (拡張子: .str) |
| | Save | 導波路形状とパラメータをファイルに保存 (拡張子: .str) |
| | Exit | システムを終了する |
| Modeling | Region | 解析領域設定ウインドウを開く |
| | Input | 導波路形状入力のためのウインドウを開く |
| Parameter | Input | パラメータ入力ウインドウを開く |
| Solver | Start solver | BPM 解析パラメータ入力と解析実行のためのウインドウを開く |
| Option | Grid Scale | グリッドの 1 目盛当たりの実際の長さを設定する |
| | Grid On/Off | グリッドの表示・非表示の切り替え |
| | View 3D | 入力した導波路形状の 3 次元表示 (Z パッファ法による) |
| | View YZ | 導波路の伝搬方向に垂直な断面の形状を表示する |

2.2 解析領域の設定

解析領域の設定画面を図 2 に示す。2 次元解析が 3 次元解析かは Dimension の横のオプションメニューで切り替える。このシステムでは、形状入力時には導波路を上から見た図を表示していて、画面上の横方向 (伝搬方向) を x , 画面上の縦方向 (横方向) を y , 画面に垂直な方向 (深さ方向) を z としている。また, x の正方向は画面の右方向, y の正方向は画面の下方向であり, 座標原点は, x 方向は左端, y, z 方向は解析領域の中心とする。各入力項目の説明を表 2 にまとめる。



(a) 2次元解析

(b) 3次元解析

図 2: 解析領域設定ウインドウ

表 2: 解析領域設定ウインドウの設定項目

| | |
|----------------------|----------------------------|
| dimension | 2次元解析・3次元解析を切り替える |
| window width | 解析領域の幅を指定する (y 方向の幅) |
| window depth | 解析領域の深さを指定する (z 方向の幅) |
| propagation distance | 伝搬方向の解析領域を指定する (z 方向の幅) |
| refractive index | 解析領域の背景屈折率を設定する |

2.3 導波路形状の入力

導波路形状を入力するためのウインドウを図 3 に示し、各項目の意味を表 3 にまとめる。
 実際の入力は以下の手順で行う。

1. 導波路断面形状の設定
2. 導波路の z 方向位置と屈折率の設定
3. Command を用いて各種導波路の入力あるいは編集

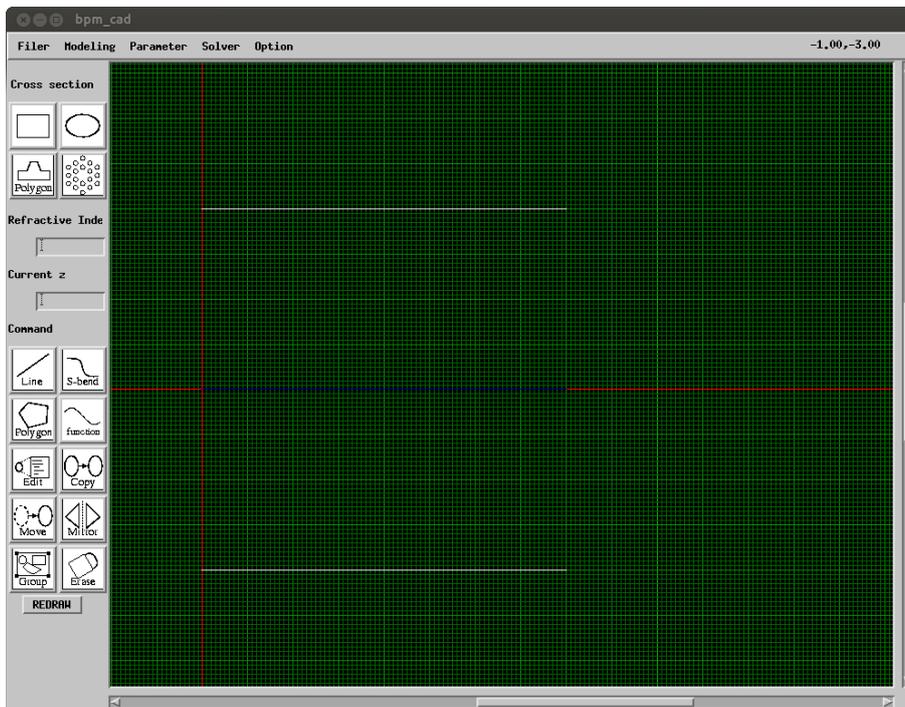


図 3: 導波路形状入力ウインドウ

表 3: 導波路形状入力画面の項目一覧

| 項目 | 説明 |
|------------------|---|
| Cross section | 導波路の断面形状の選択。ボタンを押すと各断面形状に対応するパラメータ設定ウインドウが開く |
| Refractive Index | 導波路の屈折率を設定する |
| Current z | 導波路を描く深さを指定する。方形断面に対しては導波路底面、楕円、PCF に対しては構造の中心がここで指定する z 方向位置となる。 |
| Command | 導波路を描くために用いるコマンド群でありそれぞれの機能は表??にまとめる |
| REDRAW | 描画領域を再描画する |

利用できる断面形状を図 4 に示し、パラメータの意味を表 4 にまとめる。また、利用できる導波路形状および編集項目を表 5 にまとめる。

なお、マウス操作における各マウスボタンの意味を表 6 に示す。

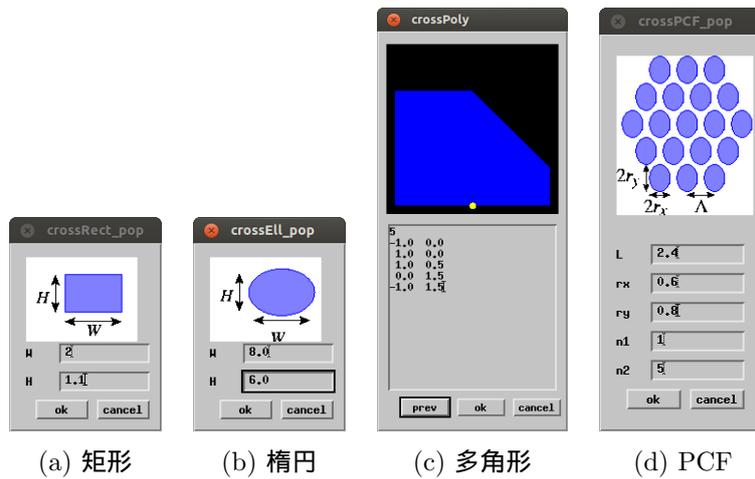


図 4: 断面形状設定ウインドウ

表 4: 導波路断面形状の設定項目

| 断面形状 | 設定項目 | 説明 |
|-----------|------|---------------------------|
| Rectangle | W | 導波路幅 |
| | H | 導波路高さ |
| Ellipse | W | 導波路幅 |
| | H | 導波路高さ |
| Polygon | | 多角形の頂点の数と頂点の座標 (y, z) |
| PCF | L | 格子間隔 |
| | rx | 空孔の y 方向の半径 |
| | ry | 空孔の z 方向の半径 |
| | n1 | 最内側のリング番号 |
| | n2 | 最外側のリング番号 |

表 5: Command の一覧

| コマンド | 説明 | マウス操作 |
|----------|-------------|-----------------------------------|
| Line | 直線導波路の入力 | 第 1 クリックで始点, 第 2 クリックで終点を決定する |
| S-bend | S 字曲り導波路の入力 | 第 1 クリックで始点, 第 2 クリックで終点を決定する |
| Polygon | 多角形構造物の入力 | 左クリックで順次頂点を指定し, 中クリックで始点と終点を結ぶ |
| Function | 任意形状導波路の入力 | 第 1 クリックで始点, 第 2 クリックで終点を決定する |
| Edit | 導波路を選択し編集 | 左クリックで導波路を選択する |
| Copy | 導波路を選択しコピー | 第 1 クリックで導波路を選択し, 第 2 クリックで位置を確定 |
| Move | 導波路を選択し移動 | 第 1 クリックで導波路を選択し, 第 2 クリックで位置を確定 |
| Mirror | 導波路を対称にコピー | 第 1,2 クリックで軸を作成し, 第 3 クリックで導波路を選択 |
| Group | 導波路のグループ化 | 第 1 クリックと第 2 クリックで矩形領域を指定しグループ化する |
| Erase | 導波路を選択し消去 | 左クリックで導波路を選択 |

表 6: マウス操作における各マウスボタンの意味

| マウス操作 | 操作 |
|-------|---------------|
| 左クリック | グリッドに合わせる |
| 中クリック | 隣接導波路の端点に合わせる |
| 右クリック | キャンセル |

2.4 入射条件と材料パラメータの設定

メニューバーの「Parameter → Input」を選択すると図5のようなウインドウが開き、このウインドウから入射条件と材料パラメータを設定する。

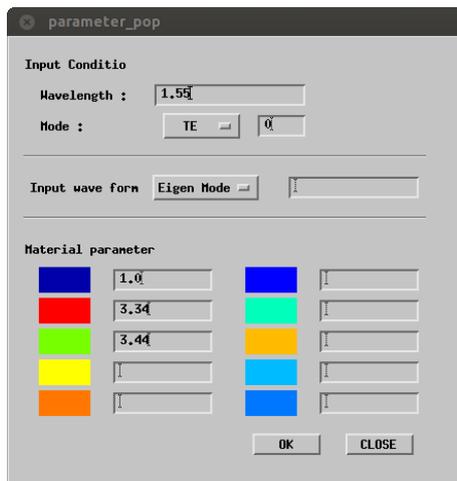


図 5: 入射波形・材料パラメータ設定ウインドウ

2.4.1 入射条件 (Input Condition)

本システムでは3種類の入射条件を指定できる。

- 固有モード入射

「Input wave form」の「Eigen Mode」を選択し、入射光の波長と偏波、モード番号を指定する。2次元解析あるいは3次元スカラー波解析のときにはTE 0がTE基本モード、TM 0がTM基本モードであり、3次元ベクトル波解析のときには通常はHybrid 0が E^x 基本モード、Hybrid 1が E^y 基本モードである。入射導波路は、入射端に接している導波路であり、複数の導波路が接している場合には、最初に入力した導波路が対象となる。

- ガウスビーム入射

「Input wave form」の「Gaussian」を選択し、テキストボックスにガウスビームの中心座標およびスポットサイズを入力する。

(例) 中心が原点、スポットサイズが $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ のとき「g(0,0,5,5)」と入力する。

- 任意波形の入射

入射波形をあらかじめなんらかの方法で計算しておき、ファイルに書き出しておいて、その結果を読み込んで使うことができる。テキストボックスに入射ファイルの保存されたファイル名を記載する(書式は後述)。

2.4.2 材料パラメータ (Material Parameter)

材料の屈折率もしくは材料名を表示している。導波路入力の際に設定した屈折率があらかじめ表示されている。グリッド非表示の際には導波路が色付け表示されており、カラーパレットの色と対応している。材料情報を編集したときには、編集したい材料のカラーパレットを右クリックすると図6に示すようなウインドウが開くので、ここから材料情報を入力する。使用できる導波路材料としては以下のものがある。

- 等方性材料

材料の屈折率を複素数で入力する。

(例) $n = 1.5 - j0.001$ の場合「1.5, 1e-3」と入力する。

- 異方性材料

材料の比誘電率テンソルを複素数で入力する .

(例) $[\epsilon_r] = \begin{bmatrix} 4.8841 & -j0.00625 & 0 \\ j0.00625 & 4.8841 & 0 \\ 0 & 0 & 4.8841 \end{bmatrix}$ の場合 $\begin{bmatrix} 4.8841, 0 & 0, -0.00625 & 0, 0 \\ 0, 0.00625 & 4.8841, 0 & 0, 0 \\ 0, 0 & 0, 0 & 4.8841, 0 \end{bmatrix}$ と入力する .

- 非線形材料

材料の屈折率と非線形係数を入力する . ただし , 現在のところ解析実行プログラムでは未対応である .

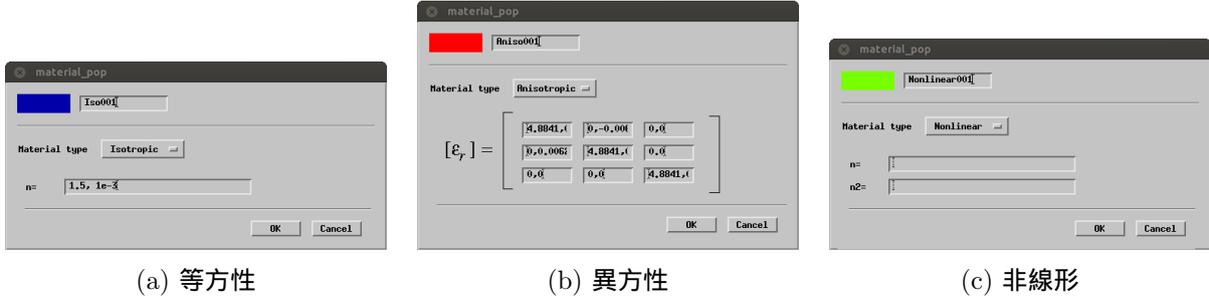


図 6: 各材料パラメータの設定ウインドウ

2.5 BPM パラメータの設定

メニューバーの「Solver → Start solver」を選択すると図 7 のようなウインドウが開き , このウインドウから BPM 解析のためのパラメータを設定する . 各設定項目の意味を表 7 にまとめる . 最後に「Save」ボタンを押すことでビーム伝搬解析のためのデータが指定したファイル名で保存される . 計算実行の方法については次節で述べる .

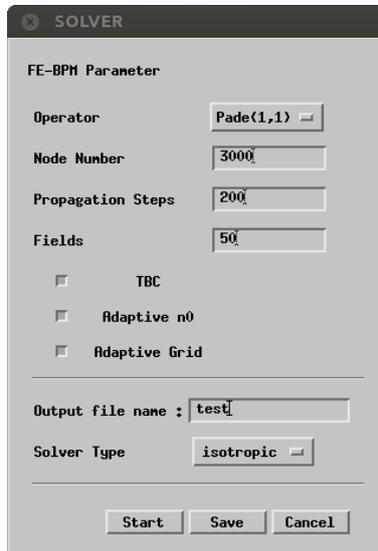


図 7: BPM パラメータの設定ウインドウ

2.6 オプション

メニューバーの Option メニューに , 形状入力をサポートするための機能がいくつか用意されている .

表 7: BPM パラメータの設定項目と意味

| 設定項目 | 説明 |
|--------------------|---------------------------------|
| Operator | 使用する基本式 (近軸式, パデ式, ヘルムホルツ式) の選択 |
| Node Number | 横方向の離散点数 |
| Propagation Steps | 伝搬方向の計算ステップ数 |
| Fildes | 界分布の書き出し回数 |
| TBC | 透明境界条件の使用の有無 |
| Adaptive n0 | アダプティブ参照屈折率の使用の有無 |
| Adaptive Grid | アダプティブメッシュの使用の有無 |
| Output file name : | データを保存するファイル名 (拡張子が自動的に付加される) |
| Solver Type : | 使用するソルバーの選択 |

2.6.1 スケールファクターの設定

Option メニューの「Scale factor」を選択すると、図 8 のようなウィンドウが開く。解析領域を設定した際には領域全体が見られるように自動的にスケールファクターが設定されているが、この数値を変えることで一部を拡大して見ることができる。数値の意味は最小のグリッドが表す実際の長さであり、単位は $[\mu\text{m}]$ である。

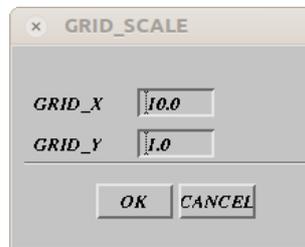
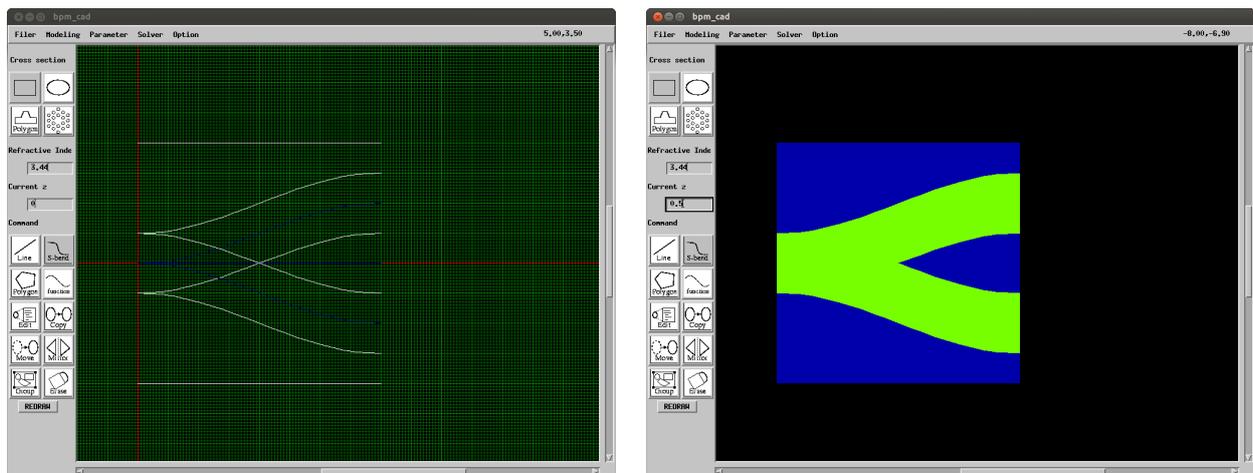


図 8: スケールファクタの設定

2.6.2 グリッドの ON/OFF

Option メニューの「Grid On/Off」を選択すると、図 9 のように、導波路境界を線で描画している状態と材料ごとに色付け表示した状態を切り替えることができる。



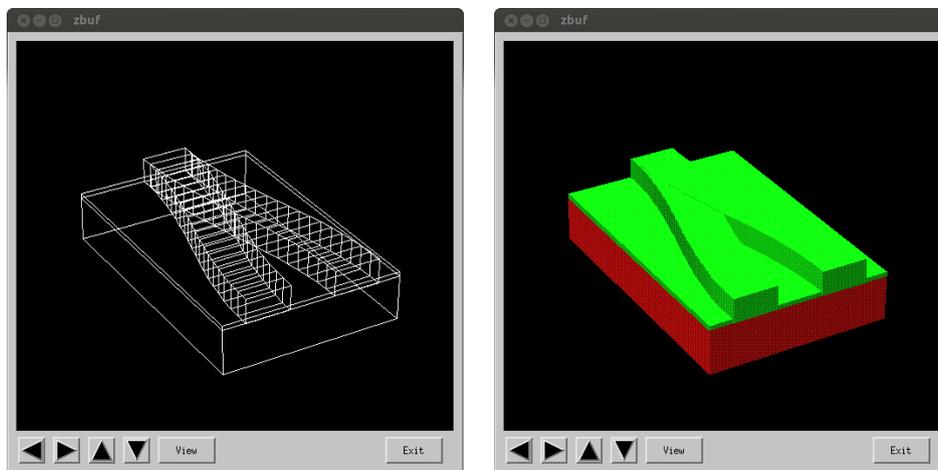
(a) グリッド ON

(b) グリッド OFF

図 9: 描画モードの切り替え

2.6.3 導波路の3次元表示

導波路を3次元構造として入力している場合には、描画領域にある z 断面(xy 面)のみが表示されているが、Optionメニューの「View 3D」を選択すると、図10のように、現在入力されている導波路形状を任意の角度から見て確かめることができる。導波路形状の表示はワイヤフレーム表示と z バッファ法により隠面消去された表示の2種類が用意されていて、「VIEW」ボタンで切り替えることができる。



(a) ワイヤフレーム表示

(b) ソリッド表示

図 10: 導波路形状の3次元表示

2.6.4 導波路の yz 断面表示

導波路を3次元構造として入力している場合には、Optionメニューの「View YZ」を選択すると、図11のように、任意の伝搬距離における導波路の yz 断面を表示することができる。伝搬距離を入力してEnterキーを押すとその伝搬距離での断面形状が表示され、伝搬距離を0にして「Replay」ボタンを押すと、伝搬方向に向かって導波路がどのように変化していくかをアニメーションとして表示できる。

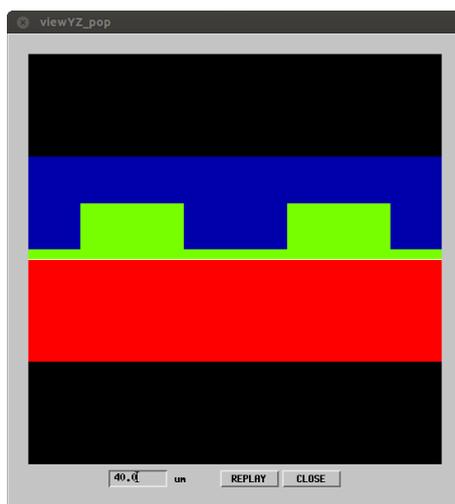


図 11: 導波路形状の yz 断面表示

3 解析実行

ここでは、ユーザが解析プログラムを改変しやすいように、ビーム伝搬解析をウインドウ上からではなくコマンド行から実行するようにしている。解析実行プログラムは有限要素ビーム伝搬法 (FE-BPM)、有限差分ビーム

伝搬法 (FD-BPM), 高速フーリエ変換ビーム伝搬法 (FFT-BPM) の 3 種類が用意されていて, それぞれ 2 次元解析, 2 次元ベクトル波解析 (異方性材料用), 3 次元スカラー波近似解析, 3 次元セミベクトル波解析, 3 次元フルベクトル波解析が用意されている. 以下に, それぞれの解析実行プログラムの使い方を説明する.

3.1 2次元解析

最も簡単な解析は等方性材料に対する 2 次元解析であり, FE-BPM, FD-BPM, FFT-BPM の全てのプログラムが用意されている. それぞれの実行方法は以下のとおりである.

- 有限要素ビーム伝搬法 (FE-BPM)
fe-bpm test
- 有限差分ビーム伝搬法 (FD-BPM)
fd-bpm test
- 高速フーリエ変換ビーム伝搬法 (FFT-BPM)
fft-bpm test

3.2 2次元ベクトル波解析

後で記述

3.3 3次元スカラー波解析

後で記述

3.4 3次元セミベクトル波解析

後で記述

3.5 3次元フルベクトル波解析

後で記述

4 後処理プログラム

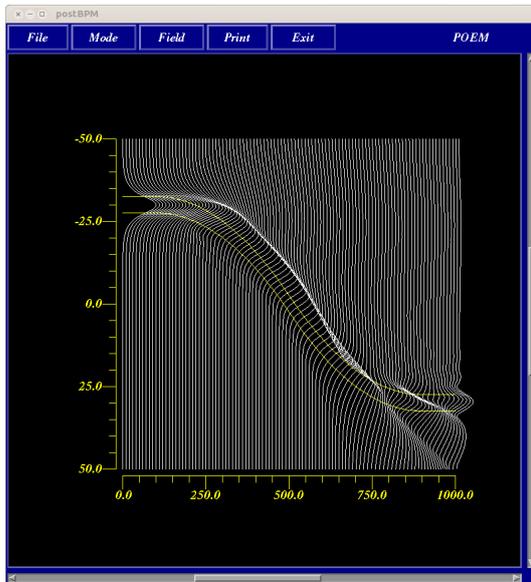
ここでは, 数値計算結果の可視化を行う.

4.1 2次元解析結果の可視化

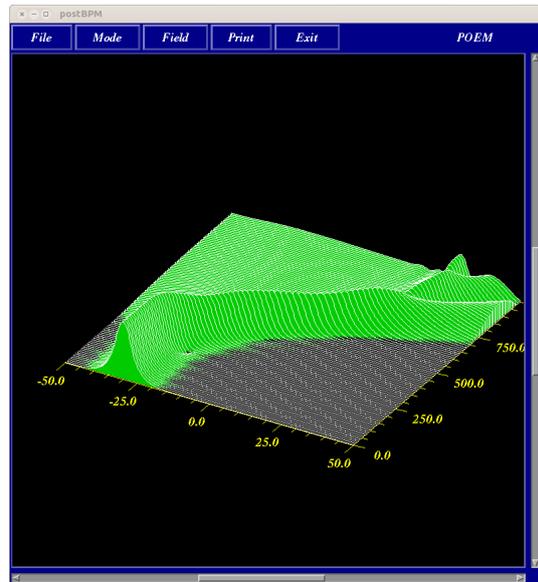
光の伝搬の様子を表示するための後処理プログラムとして postBPM が用意されている. ビーム伝搬解析を FE-BPM により行った場合には, test.fem というファイルに結果が書き出されているので

```
# postBPM test.fem &
```

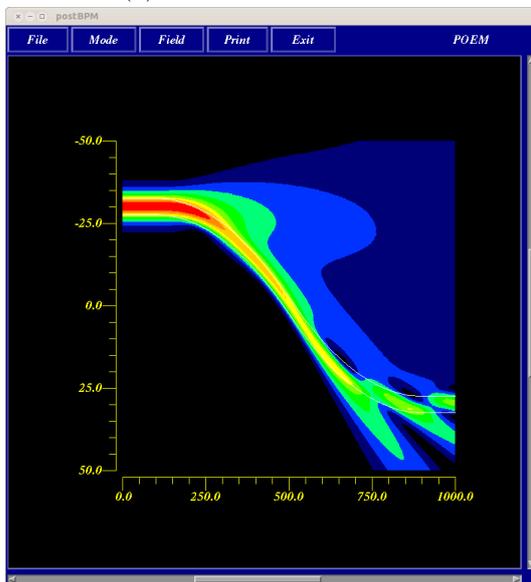
により, 後処理プログラムを起動する. 起動後にスクロールバーの位置を中央に合わせると図 12(a) に示すような光の伝搬の様子を見ることができる. さらに, メニューの「Field」ボタンを押して表示されるウインドウ上の「View」を切り替えると, 図 12(b)-(e) のように, 伝搬波形の等高線表示, 3 次元表示, ビーム伝搬解析の際の有限要素分割の更新の様子, 参照屈折率の更新の様子などを表示することができる. また, メニューの「Mode」ボタンを押すと, 図 12(f) のように, 各出力導波路への出力パワーをモードごとに表示することができる.



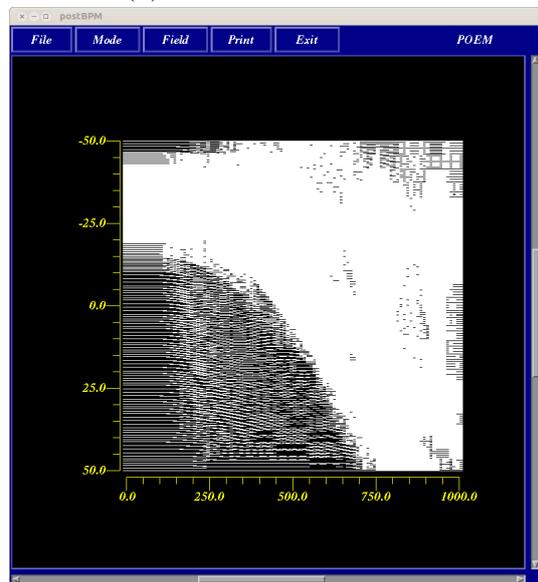
(a) 伝搬波形の2次元表示



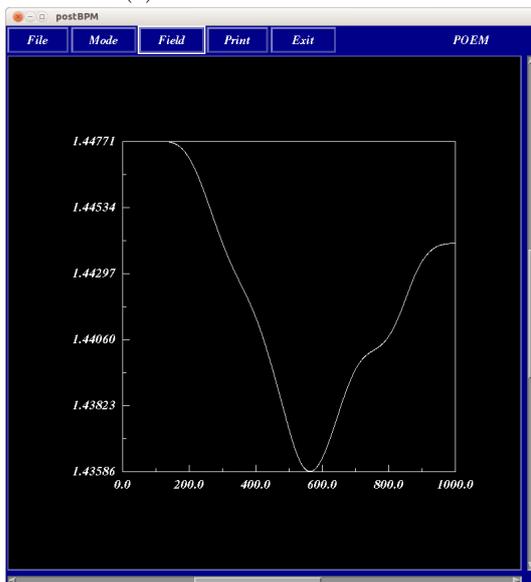
(b) 伝搬波形の3次元表示



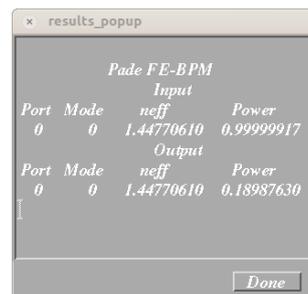
(c) 伝搬波形の等高線表示



(d) 有限要素分割の更新の様子



(f) 参照屈折率の更新の様子



(f) 各ポートへの出力パワー

図 12: 2次元解析用の後処理プログラム

4.2 3次元解析結果の可視化

後で記述