

# 高周波回路の解析・設計理論の整備と対応ソフト開発 — 方形断面光導波路の導波状態計算 —

平岡 隆晴\* 許 瑞邦\*\*

## Construction of High Frequency Circuit Analysis/Synthesis Theory and Development of the Corresponding Software — Mode Calculation of Rectangular Cross-section Optical Waveguide —

Takaharu HIRAOKA\* Jui-Pang HSU\*\*

### 1. 方形断面光導波路の導波状態計算

図1(a)に示す方形断面導波路は光波帯で使用する導波路である。伝搬時の電磁界（伝搬状態）及び伝搬速度（実効屈折率）を正確に求めることは光回路の設計で重要である。伝搬状態及び実効屈折率はMaxwellの電磁界方程式を所与の境界条件で解けば求まる。一般に有限個の伝送状態があり、伝搬に使用されるのは実効屈折率が一番大きい基本状態である。この種の導波路は、1970年代より状態整合法・変分法・数値解析等で計算されているが、高精度の回路設計には高次伝搬状態を含めて電磁界分布・実効屈折率を厳密に計算する必要とある。ここでは、スラブ状態展開・平面回路方程式・横方向等価回路の手法を活用して高次を含めた伝送状態の電磁界分布・実効屈折率を厳密に求める手法を提案し、具体的に適用する。

### 2. 導体遮蔽壁の導入と横方向等価回路

図1(a)に示す方形断面光導波路は、断面外部が無限に広がるが所望の伝搬状態の電磁界は断面外部に放射せず断面内及びその付近に電磁界が集中しているので電磁界解析を容易にするため図1(b)に示すように方形断面光導波路断面周辺に導体遮蔽壁を両側面及び上下に設ける。この構造を中心導波領域#1及び導波路外部領域#2、#3に分けると各領域は平面回路構造となり各領域で平面回路理論・変数分離法・横等価伝送線路を適用すると電磁界は表1で与えられる。 $f_{m/n}^{E/H}(z), g_{m/n}^{E/H}(z), h_{m/n}^{E/H}(z)$  は平面構造の水平偏波（H）及び垂直偏波（E）状態の高さ方向固有関数、導波路に直角・平行・面に垂直の方向を $\perp, //, k$ と定義したとき $V, J_{\perp}, J_{//}$ は圧（電圧・磁圧）と流（電流、磁流）方向成分である。平面構造での面内伝搬定数と面アドミタンス次式で与えられると

$$\gamma_p^E \quad \gamma_p^H \quad Y_p^E = j\omega\epsilon/\gamma_p^E [S] \quad Y_p^H = j\omega\mu_0/\gamma_p^H [\Omega]$$

横等価伝送線路の伝搬定数と特性アドミタンスは次式で与えられる。

$$\gamma_{\perp} = \sqrt{\gamma_p^2 - \gamma^2} \quad Y_{\perp} = Y_p(\gamma_{\perp}/\gamma_p) \quad Y_{//} = Y_p(\gamma_{//}/\gamma_p)$$

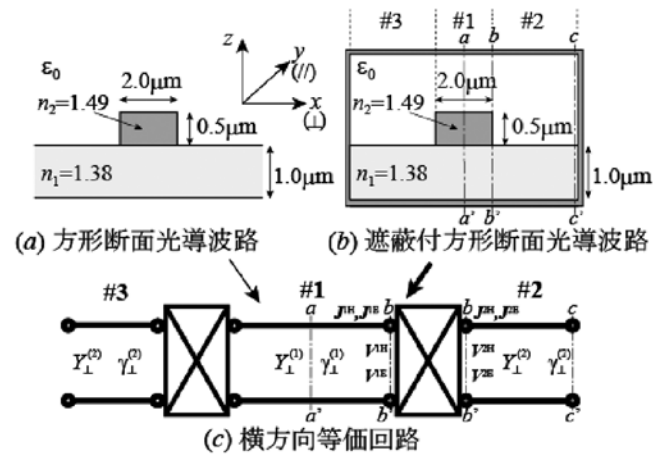


図1 方形断面導波路と横方向等価回路

各領域の横等価伝送線路は水平偏波・垂直偏波の高さ方向状態に対応した無限個の多線条線路で表現される（図1(c)）。導波路方向の伝搬定数 $\gamma$ とすると導波路方向の変数分離形は $\exp(-\gamma y)$ となるがこの項は表1では省略して表記する。

表1 導波路断面での電磁界

電界	$E_z(x, z) = -\sum_m V_m^E(x) g_m^E(z)$ $E_{\perp}(x, z) = \sum_n J_{n//}^H(x) f_n^H(z) + j\eta_0 \sum_m J_{m\perp}^E(x) h_m^E(z)$ $E_{//}(x, z) = -\sum_n J_{n\perp}^H(x) f_n^H(z) + j\eta_0 \sum_m J_{m//}^E(x) h_m^E(z)$
磁界	$H_z(x, z) = -\sum_n V_n^H(x) g_n^H(z)$ $H_{\perp}(x, z) = -\sum_m J_{m//}^E(x) f_m^E(z) + j/\eta_0 \sum_n J_{n\perp}^H(x) h_n^H(z)$ $H_{//}(x, z) = \sum_m J_{m\perp}^E(x) f_m^E(z) + j/\eta_0 \sum_n J_{n//}^H(x) h_n^H(z)$

### 3. 横方向等価伝送線路の端末条件（固有値問題）

解析する導波路（図1）は対称構造なので右半分の構造に対して解析する。側壁c-c'は電気壁、中心面a-a'は偶対称で磁気壁、奇称性で電気壁となる。導波路不連続部b-b'では電磁界接線成分の連続性から以下の数学的関係式が得られる。 $F^{EE}, F^{HH}, H^{EH}, H^{HE}$ は不連

\*准教授 電気電子情報工学科

Associate Professor, Dept. of Electrical, Electronics and Information Engineering

\*\*客員研究員 工学研究所

Invited Researcher, Research Institute for Engineering

続部での姿態結合係数行列を表す.

$$v^{2E} = (F^{1E2E})^T v^{1E} \quad \tilde{J}_{\perp}^{1E} - \frac{1}{j\eta_0} H^{1E1H} J_{//}^{1H} = F^{1E2E} \tilde{J}_{\perp}^{2E} - \frac{1}{j\eta_0} H^{1E2H} J_y^{2H}$$

$$v^{2H} = (F^{1H2H})^T v^{1H} \quad \tilde{J}_{\perp}^{1H} - j\eta_0 H^{1H1E} J_{//}^{1E} = F^{1H2H} \tilde{J}_{\perp}^{2H} - j\eta_0 H^{1H2E} J_{//}^{2E}$$

領域1b-b'で姿態圧縦行列を  $V^H$ ,  $V^E$  としたとき左右に流れる流が同一なので, 以下の固有値方程式を得る. この固有値方程式を解いて伝送姿態の伝搬定数と電磁界分布を得る.

$$\begin{bmatrix} Y^{HH} & Y^{HE} \\ Y^{EH} & Y^{EE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^H \\ V^E \end{bmatrix} = 0$$

#### 4. 計算結果

TE/TM 各30姿態を考慮して固有値問題を解いた結果, 方形誘電体の幅を変えたときの固有値 (実効屈折率) の計算結果をを図2に示す. 実線は中心電気壁, 点線は中心磁気壁で両者とも5次姿態まで計算した. 導波路幅2.0 [ $\mu\text{m}$ ] で1番目 (TE 様水平偏波動作) と2番目 (TM 様垂直偏波動作) の伝搬姿態の電磁界6成分を図4, 5に示す. 図4の水平偏波動作では主要電磁界成分は  $E_y$  と  $H_z$ , 図5の垂直偏波動作では  $H_y$  と  $E_z$  である. 両者の電磁界分布は電界と磁界を取り換えればかなり分布が一致していることが分かる. 解析手法の性質上, 導波路中心部は30個の姿態で十分な精度があると考えますが, 図1(b)の不連続部 b-b'では高次姿態が励振されるので十分ではないことが推察される. 実際, 不連続部 b-b'前後での電磁界接線6成分計算した. 不連続部前後 (導波路内側内側・外側) での  $H_y$ ,  $E_y$  成分の計算結果を実線・点線で図3に示す. 本来両者は電磁界の接線成分として一致しなくてはならない.  $E_y$  成分は一致しているが,  $H_y$  成分は一致しない所がある. 他の電磁界成分でも同様の状況があり, この不一致は考慮姿態数の増加で解消できると考えている.

#### 謝辞

穴田名誉教授及び陳春平准教授にお世話になりました.

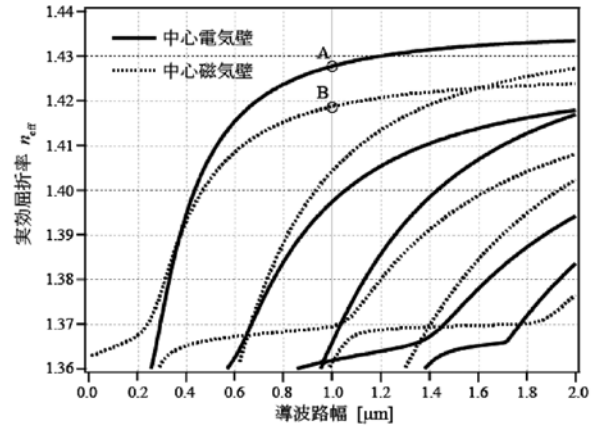


図2 1~5次実効屈折率対導波路幅

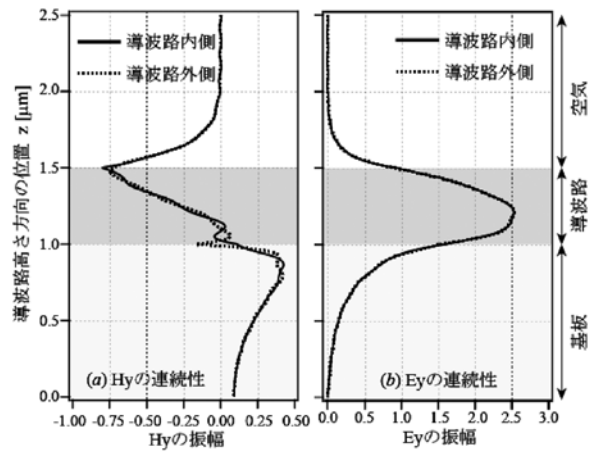


図3 不連続 b-b'前後での電磁界接線成分の連続性

#### 参考文献

- [1] Hsu, Jui-Pang and T.Anada, "Proposal of Surface-Wave Planar Circuit, Formulation of its Planar Circuit Equations and its Practical Applications", 1986 IEEE MTT-S Digest, GG-4, pp797-800

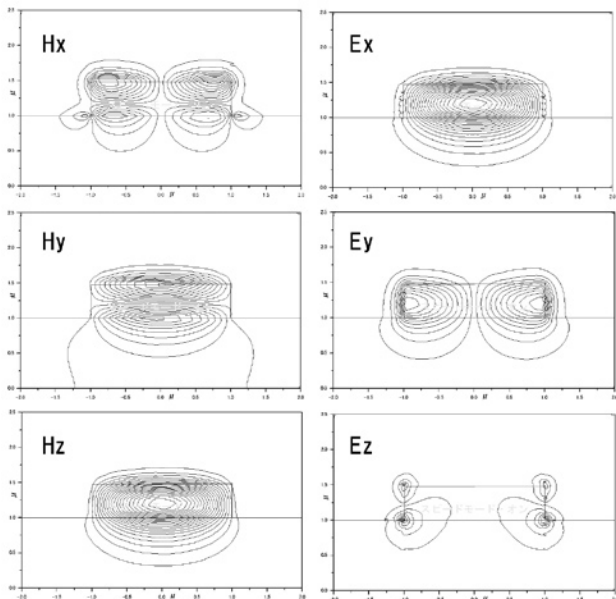


図4 中心電気壁の姿態 (A TE 様姿態 水平偏波動作)

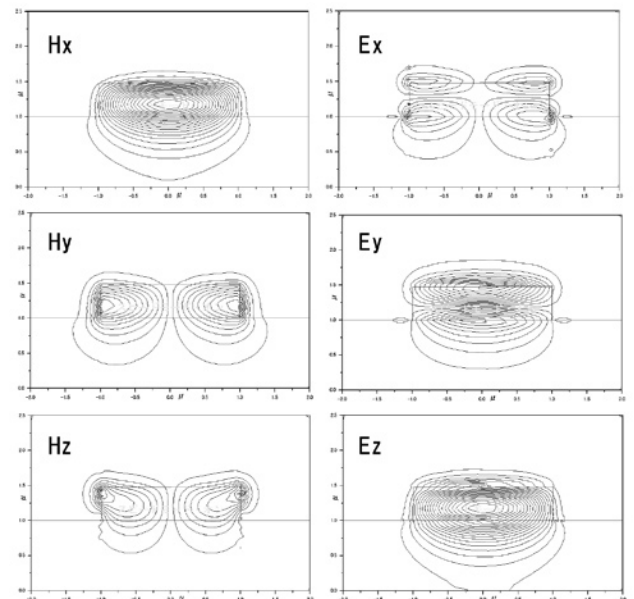


図5 中心磁気壁の姿態 (B TM 様姿態 垂直偏波動作)