



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	光集積回路設計支援システムOPTICS
Author(s)	小柴, 正則; Koshiba, Masanori; 斎藤, 浩 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 153, 133-146
Issue Date	1990-11-29
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/42262">https://hdl.handle.net/2115/42262</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	153_133-146.pdf



## 光集積回路設計支援システム OPTICS

小柴 正則      齋藤 浩      江口 真史

(平成 2 年 8 月 31 日受理)

### A Design System for Optical Integrated Circuits : OPTICS

Masanori KOSHIBA, Hiroshi SAITOH and Masashi EGUCHI

(Received August 31, 1990)

#### Abstract

A computer-aided-analysis system, OPTICS (OPTical Integrated Circuit design System), is described for the analysis and design of optical waveguides for optical integrated circuits. The system is composed of pre- and post-processing and waveguide-solver packages. The pre-processor is used to define guide geometries, index profiles, operating wavelengths, and boundary conditions—all interactively, and is linked to a computer aided mesh generation. The waveguide solver in which the scalar finite-element method is used provides effective refractive indices and field distributions. The results are displayed by the post-processor to give a physical picture. To show the validity and usefulness of this system, rib waveguides are investigated in detail.

#### 1. ま え が き

超高速光通信システムへの期待から、次世代の光学系として、複数個の光素子を 1 枚の基板上に集積化した光集積回路に対する関心が高まっているが、同時に、こうした光集積回路の極限性能を探り、一連の設計作業を支援するために不可欠な CAE (Computer-Aided Engineering) システム開発に関する要請も次第に強くなってきている。

さて、CAE システム構築のためのツールとしてよく知られている有限要素法 (Finite-Element Method : FEM) は光エレクトロニクスの分野においてもその有用性が認識され、各種光デバイスの解析や最適設計に利用され始めている。筆者らも、以前から FEM を用いて各種の光集積回路用光導波路や光ファイバの解析を行うとともに、光導波路解析用ソルバーの開発を進めてきた<sup>(1),(2)</sup>。ところで、FEM は領域分割型の数値解法であるため、光導波路の仕様決定、概念設計、さらには詳細設計のあらゆる段階において頻繁に生じる形状や材料の変更に伴い、解析領域や要素分割などの変更が必要となり、FEM に対する専門知識と多大な労力が要求されることになる。したがって、FEM を実際の設計現場でツールとして使用するためには、大規模な行列方程式をいかに速く正確に解くかという問題のほかに、解析領域の要素分割作業の自動化や、解析によって得られる膨大な出力データをユーザが容易に認識し、理解できるように表示する作業の自動化を促進する

高性能なプリ・ポストプロセッサを整備することが必要不可欠となる。

このような実情から、筆者らは、FEMの専門知識をもたないユーザにも高度な数値解析環境を提供するCAEシステムOPTICS (OPTical Integrated Circuit design System)の開発に着手してきた<sup>(3)~(6)</sup>。ここでは、OPTICSの基本構造について述べるとともに、具体的にリブ導波路への適用例を通して本システムが光集積回路用光導波路の実用レベルでの解析、設計に十分耐え得るものであることを示す。

## 2. OPTICSの概要

解析ツールとしてFEMを利用する場合、その解析プロセスは、まず、解析対象の幾何学的形状の入力を行い、有限要素に分割するプリプロセッシングの段階、次に、システム方程式を作り、固有値や固有ベクトルを求めるソルバーの段階、さらに、解析により得られた固有値や固有ベクトルから系の固有状態や界分布などを表示するポストプロセッシングの段階に分けられる。筆者らが開発を進めているOPTICSは、以上の各段階を主に図1に示すような4個の独立したモジュールによって構成している。このように機能を分散したのは、モジュール単位でのバージョンアップや交換などを容易にするためである。

以下にモジュールの機能の概略を述べる。

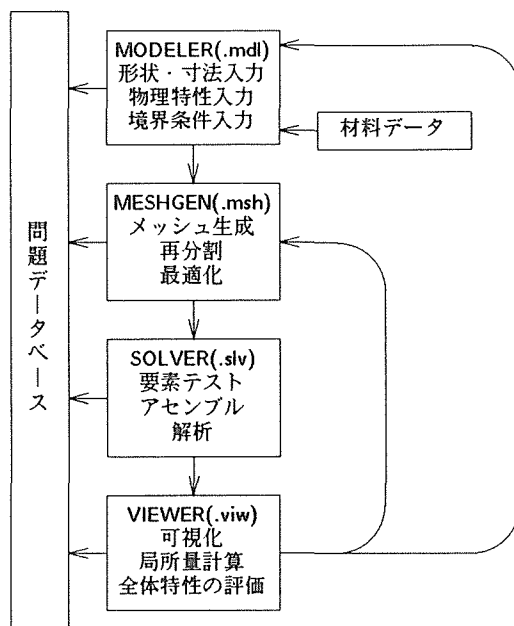


図1 OPTICSの構成

### 2. 1 形状モデラ (MODELER)

このパッケージの目的は、解析対象の形状と寸法、物理特性、さらに、境界条件などのデータをインタラクティブに入力することにある。ユーザはディスプレイ上のアイコンをマウスでクリックすることにより、作業の大部分を行うことができる。

任意形状のモデリング法には様々な方法が提案されているが、この MODELER では、まず、ユーザが形状を入力する際は、CSG 法<sup>(7)</sup>のイメージでプリミティブを選択、入力し、次に、計算機内部で有限要素分割に有利な B-Reps 法<sup>(7)</sup>に展開するというハイブリッド構造を用いている。

### 2. 2 メッシュジェネレータ(MESHGEN)

MESHGEN では、MODELER で入力された解析対象を三辺形と四辺形のブロックの集合で与え、各ブロックを三角形要素に分割する。このようなメッシュ生成法では、必ずしも完全な自動化はできないが、形状の表示および隣接ブロック内の関連性の制御が比較的容易であるといった利点がある。また、MESHGEN では、対称性をもつ構造の光導波路の場合、解析領域を縮小して計算効率を上げるため、全領域の 1/2 あるいは 1/4 の解析領域に対して、解析するモードに適合した対称面での境界条件を自動的に設定するようにしている。これらの機能によって、光導波路や FEM の専門知識をもたないユーザも容易に解析することが可能になっている。

### 2. 3 ソルバー(SOLVER)

OPTICS においては、光集積回路用光導波路の解析のために特に開発されたスカラー有限要素法<sup>(1),(2)</sup> (Scalar FEM : SFEM) がサポートされている。

任意形状の断面をもつ光導波路の導波モードは、電界の主成分が  $x$  方向であるか  $y$  方向であるかによって、それぞれ  $E^x$ モードと  $E^y$ モードとに区別される。ここに光導波路の断面を  $xy$  面とし、基板に垂直な方向を  $y$  とする。これらのモードはハイブリッドモードになっているため、その伝搬特性を厳密に評価するにはベクトル波解析を行う必要があるが、光集積回路用の光導波路の場合には、 $E^x$ モード、 $E^y$ モードをそれぞれ  $TE^y$ モード ( $E_y \equiv 0$ )、 $TM^y$ モード ( $H_y \equiv 0$ ) で近似して、いわゆるスカラー波近似解析しても実用的には十分である。このような観点から光導波路解析のための SFEM が開発されている。この方法では、解くべき行列のサイズがベクトル有限要素法<sup>(1),(2)</sup> (Vector FEM : VFEM) の場合に比べて 1/3 に縮小され、また、スプリアス解が本質的に発生しないのが特徴である。

さて、スカラー波近似解析のための基本方程式は

$$\xi_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \xi_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - \eta k_0^2 n_{eff}^2 \phi + \xi k_0^2 \phi = 0 \quad (1)$$

で与えられる。ここに  $k_0$  は自由空間波数、 $n_{eff} = \beta/k_0$  は実効屈折率であり、 $\beta$  は伝搬軸 ( $z$ ) 方向の位相定数である。また、 $\phi$ 、 $\xi_x$ 、 $\xi_y$ 、 $\eta$ 、 $\xi$  は電界、磁界の  $x$  成分をそれぞれ  $E_x$ 、 $H_x$ 、さらに、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向の屈折率をそれぞれ  $n_x$ 、 $n_y$ 、 $n_z$  として表 1 のように与えられる。

いま、光導波路の断面を 1 次 (3 節点) あるいは 2 次 (6 節点) の三角形要素を用いて分割し、式 (1) に FEM を適用すると

$$[K] \{\phi\} - n_{eff}^2 [M] \{\phi\} = \{0\} \quad (2)$$

のような一般形固有値問題が得られる。ここに  $\{\phi\}$  はすべての節点における  $\phi$  の値からなるベクトル、 $\{0\}$  は零ベクトルである。また、行列  $[K]$ 、 $[M]$  は、形状関数ベクトルを  $\{N\}$  とし、

$k_0$ で規格化した座標  $\bar{x} = k_0x$ ,  $\bar{y} = k_0y$  を用いると

$$[K] = \sum_e \iint_e \left( \zeta \{N\} \{N\}^T - \xi_x \frac{\partial \{N\}}{\partial \bar{x}} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial \bar{x}} - \xi_y \frac{\partial \{N\}}{\partial \bar{y}} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial \bar{y}} \right) d\bar{x} d\bar{y} \quad (3)$$

$$[M] = \sum_e \iint_e \eta \{N\} \{N\}^T d\bar{x} d\bar{y} \quad (4)$$

で与えられる。ここに  $\sum_e$  はすべての要素についての和をとること、 $T$  は転置することを意味する。

式(2)を解いて、固有値  $n_{eff}^2$ 、固有ベクトル  $\{\phi\}$  が求められると、残りの電磁界成分は表2のように与えられる。表中の  $Z_0$  は自由空間インピーダンスである。

表1 式(1)中の変数の意味

mode	$\phi$	$\xi_x$	$\xi_y$	$\eta$	$\zeta$
$E^x$	$E_x$	$n_x^2/n_z^2$	1	1	$n_x^2$
$E^y$	$H_x$	$1/n_y^2$	$1/n_z^2$	$1/n_y^2$	1

表2  $E^x$ モードと  $E^y$ モードの電磁界成分

field	$E^x$ mode	$E^y$ mode
$E_x$	$\phi$	$-\frac{Z_0}{n_x^2 n_{eff}} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \bar{y} \partial \bar{x}}$
$E_y$	0	$-\frac{Z_0}{n_y^2} \left( n_{eff} \phi - \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \bar{x}^2} \right)$
$E_z$	$-j \frac{1}{n_z^2 n_{eff}} \frac{\partial (n_x^2 \phi)}{\partial \bar{x}}$	$j \frac{Z_0}{n_z^2} \frac{\partial \phi}{\partial \bar{y}}$
$H_x$	$\frac{1}{Z_0 n_z^2 n_{eff}} \frac{\partial^2 (n_x^2 \phi)}{\partial \bar{y} \partial \bar{x}}$	$\phi$
$H_y$	$\frac{1}{Z_0} \left\{ n_{eff} \phi - \frac{1}{n_z^2 n_{eff}} \frac{\partial^2 (n_x^2 \phi)}{\partial \bar{x}^2} \right\}$	0
$H_z$	$-j \frac{1}{Z_0} \frac{\partial \phi}{\partial \bar{y}}$	$-j \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial \phi}{\partial \bar{x}}$

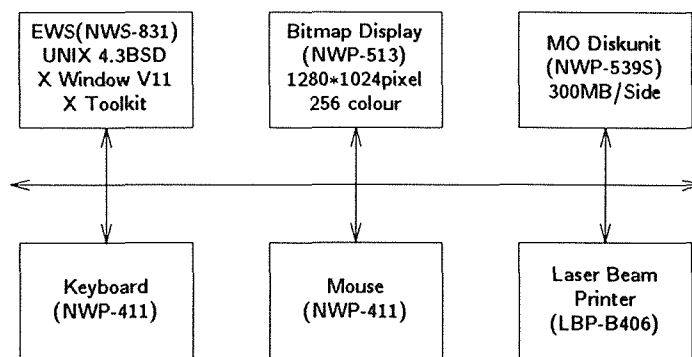
## 2. 4 ビューアー(VIEWER)

VIEWER は SOLVER によって得られた膨大な解析結果を可視化し、ユーザの物理的解釈を支援するモジュールであり、現バージョンでは、フィールドの3次元表示と等高線表示をサポートしている。3次元表示は解析結果を任意の視点から鳥瞰できるため、フィールドが複雑な変化をしている場合でも容易に評価できる。また、等高線表示は光導波路の形状に対するフィールドの広がりを2次元的に評価することを支援する。

## 3. ハードウェアの構成

CAE システムでは、プリ・ポストプロセッサに対して高機能な対話式グラフィックス・ターミナル、ソルバーに対して高速度の演算性能をもった計算機が要求される。前者には EWS (Engineering Work Station), 後者にはスーパーコンピュータが適しているが、最近の EWS の高性能化にともない、ソルバーも EWS 上で実行することが可能になってきている。

OPTICS はすべてのソフトウェアを EWS 上で実行することを目標に開発されている。図2に本研究室のハードウェアの概要を示す。UNIX EWS を核に X Window Version 11, Release 2 を介してカラービットマップディスプレイをアクセスする。ポインティングデバイスとしては、3ボタンのマウスを使用し、FEM 解析による膨大なデータは光磁気ディスクに格納する。



### NEWS(NWS-831)

CPU 68020                      コプロセッサ 68881  
 クロック 16.67MHz      メインメモリ 16MB

図2 ハードウェア構成

#### 4. OPTICS の使用例

ここでは、光集積回路用の光導波路としてよく用いられているリブ導波路<sup>(2)</sup>の解析を通して、OPTICS の操作手順を説明するとともに、その性能評価を行う。

まず、OPTICS の操作手順を説明するために、図3に示すようなリブ導波路を考える。ここに  $\lambda$  は使用波長である。

MODELER を起動するとディスプレイ上にアイコン群と作業用シートが表示される。OPTICS では統一化された操作性を提供するため、各モジュールのディスプレイ・イメージを統一している。図4に MODELER の実行例を示す。マウスで作図コマンドを選択し、光導波路の形状を入力する(図4(a))。キーボードから各部分の屈折率を入力し、境界条件を設定して MODELER での作業を終える(図4(b))。

MESHGEN の起動は、MODELER のファンクション・スイッチで行うことができる。OPTICS では有限要素として、1次要素と2次要素の両方をサポートしているため、使用する要素のタイプを入力する必要がある(デフォルトは1次要素)。要素分割は、まず、MODELER の作図コマンドを用いて、解析領域を三辺形と四辺形のブロックに分割する。各ブロックの内部は辺上の分割数を入力することで、瞬時に、自動的に有限要素分割される(図4(c))。

以上のような作業によってできたデータを SOLVER に引き渡して計算を実行する。

表3に、 $E_{11}^x$ モード、 $E_{11}^y$ モードについての解析結果を示す。比較のために、VFEM による結果<sup>(8)</sup>とスカラー差分法(Scalar Finite-Difference Method: SFDM)による結果<sup>(9)</sup>もあわせて示してある。

SOLVER はすべて EWS 上で実行されるため、解析に時間を要する。しかしながら、ファンクション・スイッチで SOLVER を起動する場合は、別のプロセスとしてバックグラウンドで処理が進むため、解析中もほかのジョブを処理することができる。

このようにして得られた解析結果を VIEWER を用いて3次元可視化、および等高線表示してみる(図4(d), (e))。さらに、 $E_{11}^x$ モードに対する界( $E_x$ )分布の3次元表示、等高線表示の一例をそれぞれ図5, 6に示す。なお、要素分割の一例を図7に示しておく(6節点2次三角形要素使用)。

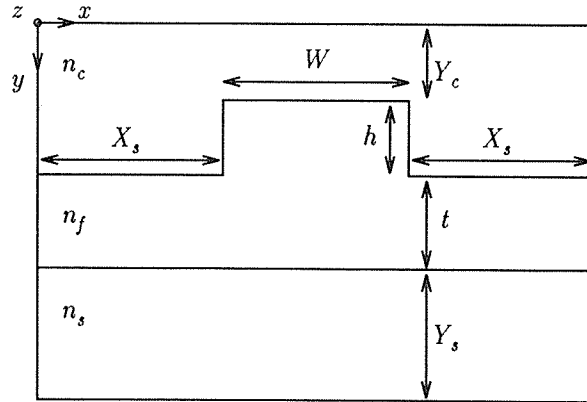
OPTICS は X Window システム上で実行されるため、複数のモジュールを同時にオープンしたり、リサイズしたり、ほかの X Window アプリケーションと並行して使用することもできる(図4(f))。

次に、図8に示すようなリブ導波路における  $E_{11}^x$ モードの解析結果を表4に示す(要素分割については図7(a)参照)。ここに  $b$  は

$$b = (n_{eff}^2 - n_s^2) / (n_f^2 - n_s^2) \quad (5)$$

で計算される正規化位相定数である。比較のために等価屈折率法(Effective-Index Method: EIM)による結果<sup>(10)</sup>、等価回路法(Equivalent Network Method: ENM)による結果<sup>(11)</sup>、変分法(Variational Method: VM)による結果<sup>(10)</sup>、ビーム伝搬法(Beam Propagation Method: BPM)による結果<sup>(12)</sup>、SFDM による結果<sup>(9)</sup>もあわせて示してある。

さらに、図9に示すようなリブ導波路光方向性結合器の解析結果を表5に示す(要素分割については図7(b)参照)。ここに  $b_e$ 、 $b_o$  はそれぞれ偶モード(even mode)、奇モード(odd mode)に対する  $b$  値であり、 $E_{11}^x$ モード、 $E_{21}^x$ モードをそれぞれ偶モード、奇モードに対応させている。

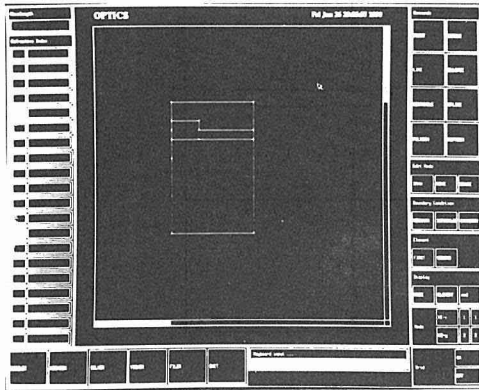


$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$n_f$	$n_s$	$n_c$	$W$ ( $\mu\text{m}$ )	$h+t$ ( $\mu\text{m}$ )	$X_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$Y_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$Y_c$ ( $\mu\text{m}$ )
1.15	3.44	3.40	1.00	3.0	1.0	3.0	5.0	1.0

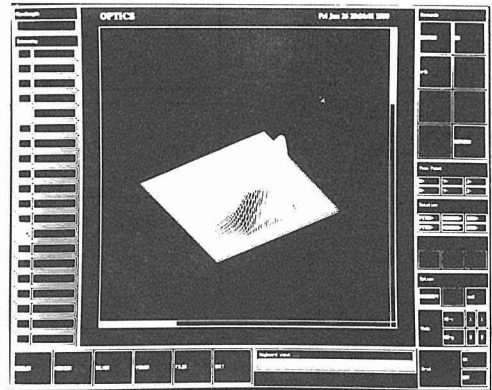
図3 リブ導波路

表3 リブ導波路(図3)の解析結果  
OPTICS-SOLVER解析条件  
6節点三角形要素  
要素数:224, 節点数:485

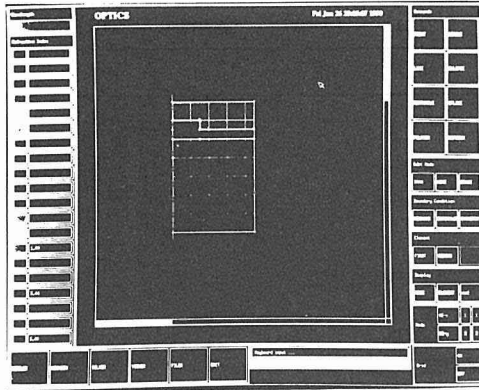
$t$ ( $\mu\text{m}$ )	$n_{eff}$				
	$E_{11}^x$			$E_{11}^y$	
	VFEM	SFDM	OPTICS	SFDM	OPTICS
0.0	3.4121	3.41188	3.41204	3.41051	3.41028
0.1	3.4122	3.41200	3.41214	3.41060	3.41037
0.2	3.41235	3.41217	3.41229	3.41073	3.41051
0.3	3.41255	3.41240	3.41249	3.41092	3.41070
0.4	3.41285	3.41271	3.41276	3.41117	3.41097
0.5	3.41315	3.41310	3.41311	3.41150	3.41132
0.6	3.41365	3.41358	3.41353	3.41190	3.41174
0.7	3.4141	3.41415	3.41404	3.41241	3.41227
0.8	3.41475	3.41484	3.41468	3.41303	3.41293
0.9	3.4156	3.41568	3.41553	3.41385	3.41383



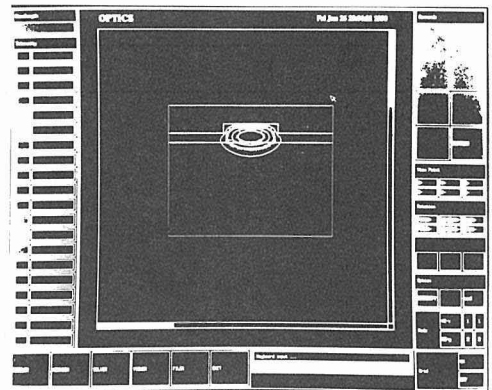
(a) 導波路形状入力



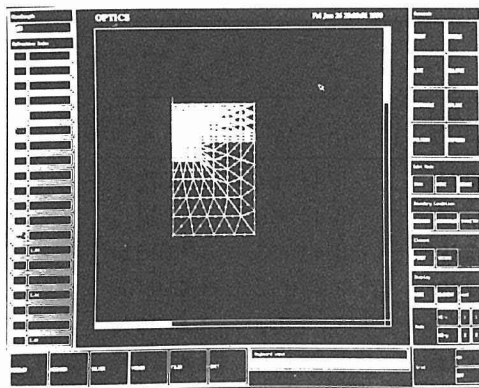
(d) 3次元表示



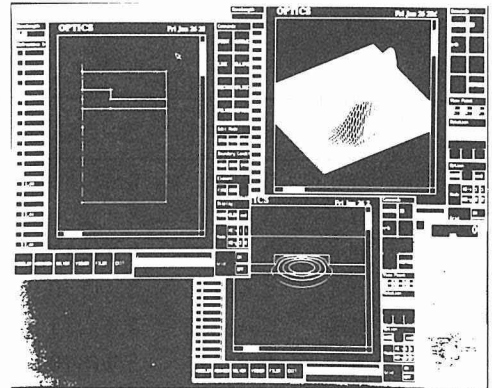
(b) 屈折率入力



(e) 等高線表示

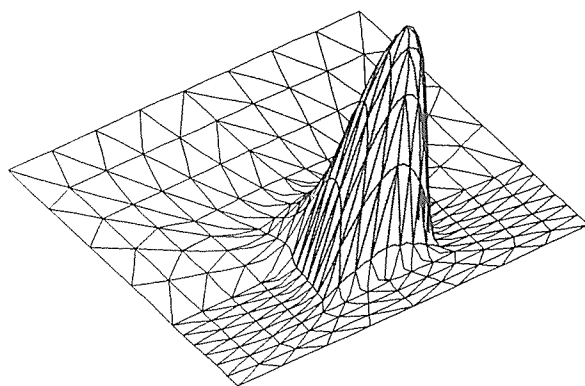
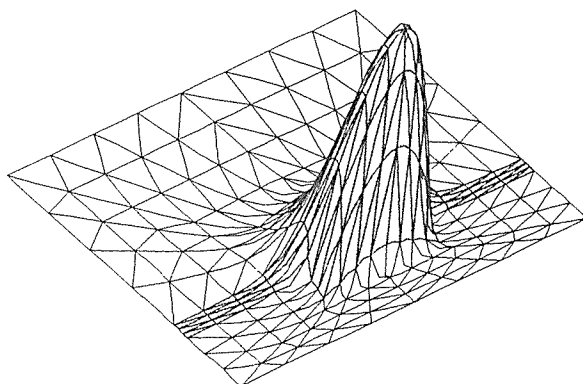
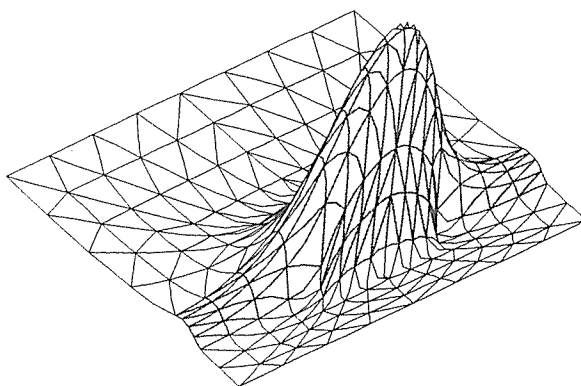


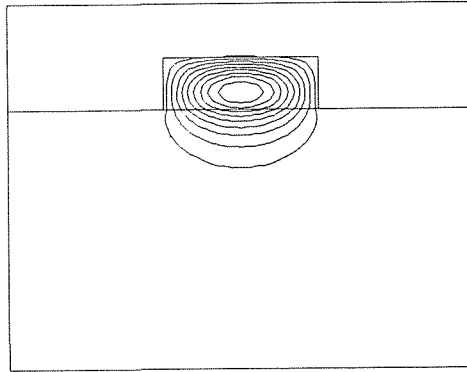
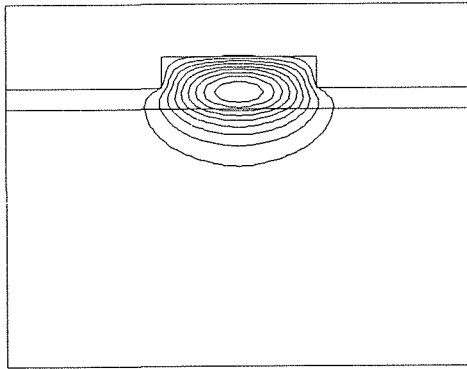
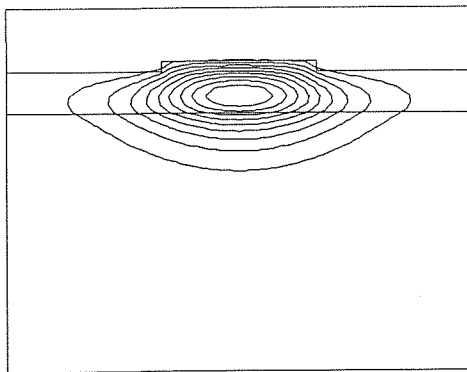
(c) 有限要素分割



(f) マルチウィンドウ

図4 OPTICS実行例

(a)  $t=0.0\mu\text{m}$ (b)  $t=0.4\mu\text{m}$ (c)  $t=0.8\mu\text{m}$ 図5  $E_{z1}$  モードに対する界分布の3次元表示

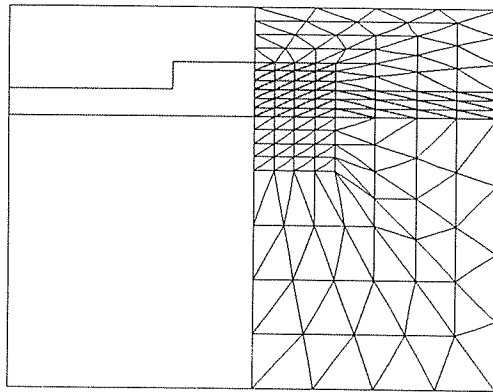
(a)  $t=0.0 \mu\text{m}$ (b)  $t=0.4 \mu\text{m}$ (c)  $t=0.8 \mu\text{m}$ 図6  $E_{11}$  モードに対する界分布の等高線表示

また、偶モード、奇モードに対する実効屈折率  $n_{eff}$  をそれぞれ  $n_e, n_o$  とすると、完全結合長  $L_c$  は

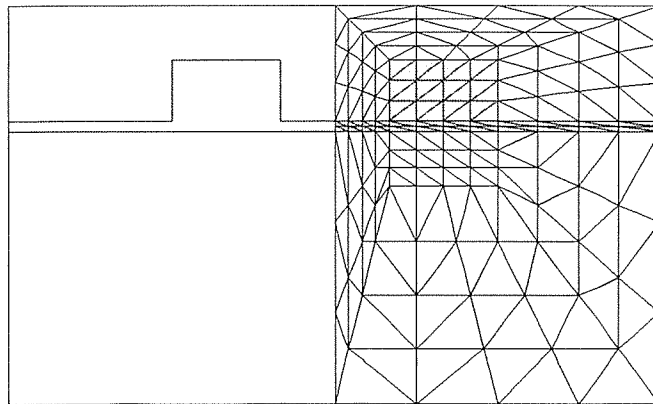
$$L_c = \lambda / \{2 (n_e - n_o)\} \quad (6)$$

から計算される。なお、表5には、比較のために、EIMによる結果<sup>(10)</sup>、ENMによる結果<sup>(11)</sup>、VMによる結果<sup>(10)</sup>、BPMによる結果<sup>(12)</sup>もあわせて示してある。

表3～5からわかるように、OPTICSによる解析結果は、ほかの解析法による結果とも比較的良好に一致しており、本システムは、解析精度の点でも十分に実用に耐え得るものであると判断される。

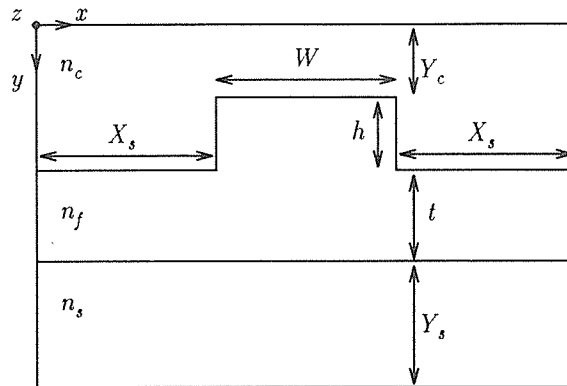


(a) リブ導波路



(b) リブ導波路光方向性結合器

図7 リブ導波路の要素分割

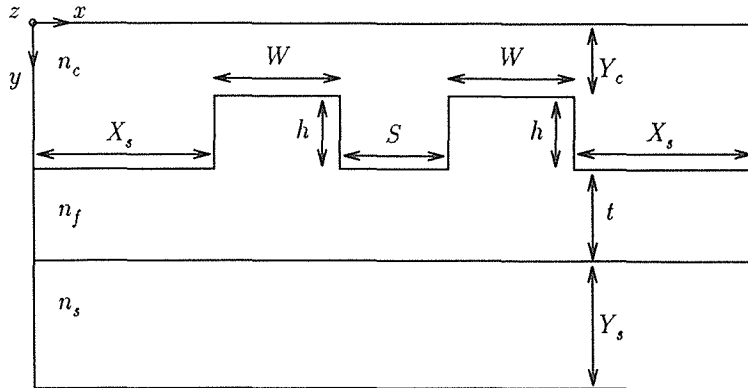


Structure	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$n_f$	$n_s$	$n_c$	$W$ ( $\mu\text{m}$ )	$t$ ( $\mu\text{m}$ )	$h$ ( $\mu\text{m}$ )	$X_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$Y_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$Y_c$ ( $\mu\text{m}$ )
1	1.55	3.44	3.34	1.0	2.0	0.2	1.1	3.0	5.0	1.0
2	1.55	3.44	3.36	1.0	3.0	0.9	0.1	3.0	5.0	1.0
3	1.55	3.44	3.435	1.0	4.0	3.5	2.5	4.5	7.5	1.0

図8 リブ導波路

表4 リブ導波路(図8)の解析結果  
OPTICS-SOLVER解析条件  
6節点三角形要素  
Structure 1 要素数:224, 節点数:485  
Structure 2 要素数:224, 節点数:485  
Structure 3 要素数:240, 節点数:519

	Structure	EIM	ENM	VM	BPM	SFDM	OPTICS
$n_{eff}$	1	3.39032	3.38819	3.39045	3.3913	3.38693	3.39017
	2	3.39548	3.39535	3.39489	3.3960	3.39544	3.39527
	3	3.43739	3.43686	3.43672	3.4365	3.43681	3.43699
$b$	1	0.4995	0.4782	0.5008	0.5093	0.4656	0.4981
	2	0.4407	0.4390	0.4332	0.4471	0.4401	0.4380
	3	0.4783	0.3728	0.3446	0.2998	0.3623	0.3974



Structure	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$n_f$	$n_s$	$n_c$	$W$ ( $\mu\text{m}$ )	$t$ ( $\mu\text{m}$ )	$h$ ( $\mu\text{m}$ )	$S$ ( $\mu\text{m}$ )	$X_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$Y_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$Y_c$ ( $\mu\text{m}$ )
1	1.55	3.44	3.34	1.0	2.0	0.2	1.1	2.0	3.0	5.0	1.0
2	1.55	3.44	3.36	1.0	3.0	0.9	0.1	2.0	3.0	5.0	1.0
3	1.55	3.44	3.435	1.0	4.0	3.5	2.5	2.0	4.5	7.5	1.0

図9 リブ導波路光方向性結合器

表5 リブ導波路光方向性結合器 (図9) の解析結果  
OPTICS-SOLVER解析条件  
6 節点三角形要素

Structure 1 要素数: 256, 節点数: 537  
 Structure 2 要素数: 256, 節点数: 537  
 Structure 3 要素数: 268, 節点数: 567

	Structure	EIM	ENM	VM	BPM	OPTICS
$b_c$	1	0.49953708	0.4782	----	0.518	0.50125762
	2	0.446	0.4436	0.436	0.459	0.44230827
	3	0.532	0.402	0.352	0.384	0.41821391
$b_o$	1	0.49953705	0.4782	----	0.506	0.50123658
	2	0.434	0.4319	0.424	0.446	0.43127565
	3	0.398	----	0.273	0.218	0.32988635
$L_c$ (mm)	1	$3 \times 10^5$	----	----	65.1	368.3
	2	0.807	0.818	0.827	0.71	0.8768
	3	1.152	----	1.968	0.93	1.755

## 5. む す び

筆者らの研究室で開発中の光集積回路設計支援システム OPTICS の概要を述べ、実行例を示した。すべての処理を EWS 上で行うため、ソルバーの実行に多くの時間を費やすが、問題の設定から解析結果の出力までのトータルで考えると十分実用に耐え得るシステムであると思われる。

RISC チップ搭載の高速ワークステーションが出始めた今日、このような対話型数値解析パッケージのニーズはますます大きくなると考えられる。今後、拡散形光導波路や異方性光導波路など、応用範囲を拡張するとともに、各モジュールのバージョンアップを、操作性の観点から進めていきたい。また、ソルバーの高速化をアルゴリズムの点から再検討したい。

## 謝 辞

本研究の一部は、文部省科学研究費補助金、ならびに財団法人高柳記念電子科学技術振興財団の援助のもとに行われたことを記し、謝意を表する。

## 文 献

- (1) 小柴正則, “光・波動のための有限要素法の基礎”, 森北出版, 1990.
- (2) 小柴正則, “光導波路解析”, 朝倉書店, 1990.
- (3) 小柴, 平山, 江口, 中村, “光導波エレクトロニクスCAEシステムの開発”, 第2回札幌国際コンピュータグラフィックスシンポジウム論文集, pp. 24-29, 1988.
- (4) 小柴, 斎藤, 江口, “光集積回路設計支援システムOPTICS——形状モデラ・有限要素法解析用プリプロセッサの開発” 第3回札幌国際コンピュータグラフィックスシンポジウム論文集, pp. 171-176, 1990.
- (5) 斎藤, 江口, 小柴, “光集積回路設計支援システム——OPTICS——”, 日本シミュレーション学会第11回計算電気・電子工学シンポジウム論文集, pp. 317-322, 1990.
- (6) 斎藤, 江口, 小柴, “光集積回路用光導波路向け設計支援システムOPTICS-GUIDEの開発”, 電子情報通信学会技術研究報告, MW90-61, 1990.
- (7) J. C. サボナディエル, J. L. クーロン (神谷紀生訳), “有限要素法を使ったCAD”, サイエンス社, 1988.
- (8) B. M. A. Rahman and J. B. Davies, “Vector-H finite element solution of GaAs/GaAlAs rib waveguides” IEE Proc., Vol.132, Pt. J, No. 6, pp. 349-353, Dec. 1985.
- (9) M. S. Stern, “Semivectorial polarized finite difference method for optical waveguides with arbitrary index profiles”, IEE Proc., Vol. 135, Pt. J, No. 1, pp. 56-63, Feb. 1988.
- (10) M. J. Robertson, S. Ritchie, and P. Dayan, “Semiconductor waveguide: analysis of optical propagation in single rib structures and directional couplers”, IEE Proc., Vol. 132, Pt. J, No. 6, pp. 336-342, Dec. 1985.
- (11) N. Nagil and C. G. Fonstad, “Theoretical and experimental study of the analysis and modeling of integrated optical components”, IEEE J. Quantum Electron., Vol. 24, No. 11, pp. 2215-2226, Nov. 1988.
- (12) M. D. Feit and J. A. Fleck, Jr, “Analysis of rib waveguides and couplers by the propagating beam method”, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 7, No. 1, pp. 73-79, Jan. 1990.