

光学技術者のための

# 電磁場解析入門

企画 (社)応用物理学会 分科会 日本光学会 光設計研究グループ

## まえがき

1960年のレーザの発明をきっかけとして急速に発展した光技術は、情報化社会に様々な変化をもたらしています。コンピュータ、半導体レーザ、光ファイバ通信の開発などとともに幕を開けた21世紀のマルチメディア情報社会では、膨大な情報量の制御に向けて、超高速・大容量のフォトニック情報システムへのさらなる期待が寄せられています。また、光通信、光記録、ディスプレイから情報出力、加工、計測、太陽電池、医療診断、家庭における娯楽まで、人々の生活を支え、産業や経済活動を発展させる基盤技術として、現在では重要な地位を確立しているといえるでしょう。

一方、これらの期待に答えるため、光技術は常に革新的でなければなりません。そして、新たなイノベーションを生み続けていくためには、光の本質に対する物理的な理解とともに、開発研究から実用化までの具体的視点が要求されています。

本書は、2008年10月14・15日の2日間にわたって開催された光設計研究グループ、第3回チュートリアル「光学技術者のための電磁場解析入門」に、その企画の基をおいています。このチュートリアルは、最近のレーザ光源、超微細化技術等の急速な進展によって、トピカルなテーマとなっていた時間領域の数値解析法について、その基礎から応用までを「使える」形で理解を深めてもらうことを主眼として開催されました。両日の予想を大幅に上回る参加者と、さらなる要望を受けて、「月刊オプトロニクス」(09年1月号～10年1月号)には、その後、より広い領域をカバーした解説記事が連載されることとなりました。本書はこの連載を単行本にまとめたものです。連載に掲載された原文には、一部を除き新たな加筆は行うことはせずに、内容における若干の重複や記号の不整合は、そのままにしてあります。

電磁場解析入門書としては、基礎から幅広い分野における応用までが納め

られた理解しやすい良い書籍になったと思っています。本書が、電磁場解析への興味をかきたて、さらなる理解の助けになれば、編集者・著者一同にとってこのうえない喜びです。また、読者各位から忌憚のないご意見をいただければ幸いです。

(株)オプトロニクス社の川尻多加志編集長、編集担当の宮崎尚樹氏にはオプトロニクス誌連載の段階から書籍刊行まで、辛抱強くおつきあいいただき、大変お世話になりました。この場を借りて感謝申し上げます。

なお、本書の企画に係った、光設計研究グループは、日本光学会の研究グループとして平成5年7月に発足致しました。光学設計は歴史の長い技術であるとともに、高度な光学機器、光学素子用の技術開発が絶え間なく進められている革新的な分野でもあり、将来の光産業においても基幹的な役割を担うことが期待されます。グループは、光学設計およびその周辺の研究者の情報交換をはかり、光学設計分野の研究推進に寄与することを目的として設立されました。

その活動は、研究会や国際会議の開催を中心に、学術講演会における発表支援や環境整備、光設計賞の授与、会誌の発行などです。活動分野は、レンズ設計から回折光学、光記録、光通信、光コンピューティング、等すべての光学分野を含んでいます。

(光設計研究グループホームページURL：<http://www.opticsdesign.gr.jp/>)

2010年4月吉日

編集委員長 小館 香椎子

## 編集委員会

(敬称略、五十音順)

### 編集委員長

小館 香椎子 日本女子大学名誉教授、(独)科学技術振興機構 男女共同参画  
主監

### 編集委員

小濱 昭彦 (株)ニコン 映像カンパニー 開発本部第二設計部 副主幹  
雜賀 誠 (株)トプコン 研究開発センター  
柴床 剛玄 日本電気(株)知的資産開発推進部  
白土 昌孝 (株)東芝 研究開発センター 主任研究員  
竹内 修一 HOYA(株)光学研究所 光学設計室 マネージャー  
山形 直樹 HOYA(株)光学研究所 光学設計室  
渡邊 恵理子 (独)物質・材料研究機構 独立研究者

### 執筆者

(敬称略、五十音順)

荒川 泰彦 東京大学 生産技術研究所 教授、東京大学 ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構長  
市川 裕之 愛媛大学 大学院理工学研究科 電子情報工学専攻 准教授  
岩本 敏 東京大学 生産技術研究所 准教授  
岡本 勝就 アイディ(株)CTO  
小館 香椎子 日本女子大学名誉教授、(独)科学技術振興機構 男女共同参画  
主監  
齊藤 公博 ソニー(株)コアデバイス開発本部 ストレージ・メモリ事業開  
発部門 次世代光システム開発部 統括課長  
齊藤 真紀子 コニカミノルタテクノロジーセンター(株)デバイス技術研究所  
アドバンスト加工開発室

関口 哲司	サイバネットシステム(株) EDA事業部 EDAソリューション部
高橋 浩	日本電信電話(株) NTTフォトニクス研究所 複合光デバイス研究部 研究グループリーダー
高山 佳久	(独)情報通信研究機構 新世代ワイヤレス研究センター 宇宙通信ネットワークグループ 主任研究員
谷藤 忠敏	北見工業大学 電気電子工学科 教授
並木 武文	富士通(株) テクニカルコンピューティング・ソリューション事業本部 プロジェクト統括部長 博士（工学）
森川 泰考	大日本印刷(株) 電子デバイス事業部 電子デバイス研究所 第一研究室 室長

---

---

## 目 次

---

---

はじめに .....	1
------------	---

(荒川 泰彦)

<b>第1章 電磁場解析を用いた回折光学素子設計と 応用システム .....</b>	<b>5</b>
--	----------

(小館 香椎子)

1. はじめに .....	5
2. DOEの数値解析法 .....	6
3. RCWAの理論 .....	8
3.1 RCWAに基づく周期構造中の光のふるまい .....	8
3.2 各領域における電磁場の一般解 .....	12
3.3 境界での連続条件によるモード係数の決定 .....	15
4. RCWA法によるDOEの数値解析の例 .....	17
5. Volume Phase Holographic (VPH) グレーティングの特性解析と 応用システム .....	20
5.1 天体観測用分光システム .....	20
5.2 フォトニックネットワーク用波長分離システム .....	22
6. まとめ .....	24

<b>第2章 FDTD法による3次元電磁場解析 .....</b>	<b>26</b>
-----------------------------------	-----------

(市川 裕之)

1. はじめに .....	26
2. マクスウェルの方程式の差分化 .....	27
2.1 電場に関する差分化 .....	29

2.2 磁場に関する差分化 .....	32
2.3 安定化条件 .....	34
2.4 媒質定数の割り当て .....	36
3. 初期条件 .....	37
3.1 球面波 .....	37
3.2 平面波 .....	37
3.3 Total field / scattered field .....	40
4. 境界条件 .....	45
4.1 Mur の境界条件 .....	46
4.2 Perfectly matched layer (PML) .....	48
5. 計算例 .....	53
5.1 矩形完全導体開口による平面波の回折 .....	53
5.2 誘電体立方体による平面波の回折 .....	55
6. より複雑な問題に向けて .....	56
7. おわりに .....	57
<b>第3章 FDTD法による光電磁場解析の基礎と応用 .....</b>	<b>60</b>
(高山 佳久)	
1. はじめに .....	60
2. FDTD を構成する要素技術 .....	61
2.1 電磁場伝搬の取扱い .....	61
2.2 電磁場の導入と計算領域の取扱い .....	65
2.3 境界の取扱い .....	71
2.4 分散媒質の取扱い .....	75
3. まとめ .....	78
<b>第4章 光導波路デバイス内の光波伝搬解析 .....</b>	<b>80</b>
(岡本 勝就)	
1. はじめに .....	80

---

2. 等価屈折率法 .....	80
3. ビーム伝搬法 .....	88
3.1 2次元のBPM .....	89
3.2 3次元のBPM .....	100
3.3 セミベクトルBPM .....	104
4. おわりに .....	108

## 第5章 FDTD法によるフォトニック結晶中の光電磁場解析

.....	110
(岩本 敏)	
1. はじめに .....	110
2. フォトニック結晶研究における光電磁場解析 .....	111
3. フォトニック結晶ナノ共振器の設計 .....	112
3.1 解析領域の設定 .....	113
3.2 励振とスペクトル情報の抽出 .....	114
3.3 Q値の評価 .....	115
3.4 共振器モード分布 .....	117
4. フォトニックバンドギャップの計算 .....	118
5. まとめ .....	121

## 第6章 FDTD法を用いた生体内光伝搬解析と

拡散光トモグラフィへの応用 .....	124
---------------------	-----

(谷藤 忠敏)

1. はじめに .....	124
2. 光拡散方程式と波源及び境界条件 .....	126
2.1 光拡散方程式 .....	126
2.2 光拡散方程式の波源 .....	127
2.3 境界条件 .....	128
3. FDTD解析 .....	129

3.1 Yee格子の定義 .....	130
3.2 FDTD解 .....	131
3.3 境界条件 .....	132
3.4 Yee格子点への波源接分 .....	136
3.5 解析精度 .....	137
3.6 解析精度の格子サイズ依存性 .....	138
3.7 解析時間 .....	139
4. 本解析法の拡散光トモグラフィへの応用 .....	140
5. まとめ .....	143
<b>第7章 光記録分野における電磁場解析 .....</b>	<b>145</b>
(齊藤 公博)	
1. はじめに .....	145
2. 各種の電磁場解析手法 .....	146
3. FDTD法を用いた光ディスク再生信号解析 .....	148
3.1 光ディスク解析におけるFDTD法適用のポイント .....	148
3.2 FDTD法を用いた光ディスクの再生信号解析の例 .....	149
4. 平面波展開を用いた光ディスク再生信号解析 .....	152
4.1 平面波回折計算法について .....	152
4.2 FMM法を用いた光ディスクの解析例 .....	153
5. スカラー回折計算を用いた体積型光ディスクの再生信号解析 .....	155
5.1 体積記録媒体におけるスカラー回折計算方法を用いた 光ディスクの解析例 .....	156
6. おわりに .....	157
<b>第8章 フォトリソグラフィー分野での光電磁場解析 .....</b>	<b>159</b>
(森川 泰考)	
1. はじめに .....	159
2. リソグラフィーシミュレーションと光電磁場解析 .....	160

---

2.1	リソグラフィーシミュレーションとは	160
2.2	露光装置の光学系とシミュレーションソフトの働き	160
2.3	光電磁場解析の用途と特徴	161
2.4	液浸露光対応マスクの課題	163
3.	液浸露光対応マスクの最適化検討	164
3.1	マスク材料の光学特性	164
3.2	石英基板の複屈折の影響	168
3.3	ペリクル膜厚の影響	170
4.	おわりに	174

## 第9章 汎用3次元電磁波解析ソフトウェア Poynting for Optics による電磁場解析の実際 ..... 175

(関口哲司, 並木武文)

1.	はじめに	175
2.	Poynting for Optics の機能	176
2.1	モデリング機能	176
2.2	媒質定義機能	177
2.3	光源設定機能	178
2.4	グリッド生成機能	179
2.5	ポスト処理機能	180
3.	バージョン3（2009年11月リリース）における新機能	182
3.1	形状適合機能	182
3.2	サブグリッド機能	184
3.3	立体波源	186
4.	適用事例	188
4.1	多層膜光ヘッド	188
4.2	表面プラズモン	190
4.3	スーパープリズムとスーパーレンズ	193
5.	並列計算について	195

6. おわりに .....	196
---------------	-----

## 第10章 波面整合法による光導波路設計とその応用 ..... 198

(高橋 浩)

1. はじめに .....	198
2. 波面整合法の原理 .....	200
3. モザイク型 .....	205
4. 塗りつぶし型 .....	207
5. まとめ .....	211

## 第11章 RCWA法による広帯域1/4波長板の最適設計 ... 213

(齊藤 真紀子)

1. はじめに .....	213
2. 1/4波長板 .....	214
3. 設計背景 .....	216
3.1 目標性能 .....	216
3.2 設計パラメータ .....	216
3.3 2枚構成 .....	217
4. 設計手法 .....	217
5. 設計解及び素子作製結果 .....	223
5.1 設計解 .....	223
5.2 素子作製 .....	223
5.3 光学評価 .....	225
6. 実用に向けて .....	225
6.1 入射光角度依存性 .....	225
6.2 エリア分割 .....	228
7. まとめ .....	230

# はじめに

1970年は、光デバイスの分野にとって歴史的な年であった。この年は、米国ベル研究所の林・Panish やソ連のヨッフェ研究所の Alferov らが、半導体レーザの室温連続発振をダブルヘテロ接合構造の導入により達成に成功した年である。また、同じ年に米国コーニング社により 20 dB/km という当時として革新的な低損失光ファイバが実現された。この二つの出来事が光ファイバ通信時代の本格的な幕開けの起点となったことは周知のとおりである。

一方、同じく 40 年前の 1969 年、IBM ワトソン研究所の江崎らが半導体超格子を提案し、波動関数エンジニアリングという概念を生み出した。この概念は電子デバイスおよび光デバイスの両方の発展に多くの革新をもたらした。光デバイスにおいては、量子井戸レーザがその代表例である。量子井戸レーザは、1990 年代には光信用レーザとして実用化され、青色窒化ガリウム発光ダイオードやレーザの開発の成功にも貢献した。

さらに、もう一つ、通信用光デバイスにおいて、米国ベル研究所の S. E. Miller らが集積光学（Integrated Optics）を提案したのも 40 年前である。これは、平面基板上で光機能素子を光導波路で結合して光集積回路をつくるという概念である。これは、今や、シリコン基板の石英系光導波路をベースにした平面回路として、アレー導波路回折格子を含めた受動型光集積回路として成熟し、波長分割多重や光信号の分岐、光路切り替えの機能の集積化を可能にしており、今日の光通信ネットワークにおける基幹光部品となっている。

40 年を経た今日、これから光デバイスの発展はどこにあるのだろうか。

その一つが、ナノフォトニクスである。ナノフォトニクスは、ナノエレクトロニクスと対応する概念として、「ナノ構造をベースにしたフォトニクス」を総称したものである。量子ドット、フォトニック結晶、プラズモニクス、近接場光学、シリコンフォトニクスなどは、ナノフォトニクスの中心的概念である。量子ドットは1982年に筆者らにより提案され、今や通信用レーザの実用化に向けて着実に技術開発が進展している。また、フォトニック結晶は、1987年のYablonovitchによる3次元フォトニック結晶の提案が、フォトニクスの研究者に屈折率周期構造の魅力を提示した。残念ながら当初期待されたほどには現時点では実用化が進んでいないが、高Q値の共振器などは、いろいろ応用が期待できる。

さて、このようなフォトニック素子・構造の発展において、それらの特徴を十分に活用し、新たな機能を創出するためには、光と物質との相互作用の物理を理解する必要がある。また、光学的設計手法も依然として不可欠な役割を果たしており、コンピューターの能力の向上とともに、手法のさらなる発展と普及が重要になっている。

本書は、このような先端的光素子の設計や動作理解に必要な光学的な解析手法について概観することを目的として、この分野の第一線の研究者がそれぞれ分担してまとめられたものである。解析手法としては、これまで周波数領域で実施される事が多かったが、最近の光エレクトロニクスの進展に伴い、時間領域での解析を必要とする問題が増えてきている。この問題の数値解析法として有限差分時間領域法（Finite-Difference Time-Domain: FDTD）がある。この手法は、空間と時間の変化を同時に含む領域に対して、領域を時空間的に離散化し、固有の差分法から電磁界を逐次求める解法である。FDTD法は波長と同程度あるいは少し大きい程度の微細構造でのふるまい、非周期構造、非線形光学現象の伝搬の解析にも幅広く適用可能である。

本書は、このFDTD法を中心にその基本的考え方や応用について主に論じている。

まず、第1章では、電磁場解析を用いた回折光学素子設計と応用システム

について一般的に論じられる。第2, 3章においては, FDTD法による光電光学技術者のための電磁場解析全般について議論を行う。第4章以降では, 光導波路デバイス, フォトニック結晶, 生体内光伝搬解析と拡散光トモグラフィへの応用, 光記録, フォトリソグラフィについて主として, FDTD法の適用を論じる。さらに, 第9章では, 汎用3次元電磁波解析ソフトウェアを使用した電磁場解析の実際について理解を深め, また, 10章, 11章では, 他の解析手法として, 波面整合法, 厳密結合波解析法 (Rigorous Coupled Wave Analysis: RCWA), それぞれについて紹介する。これらの解析手法の理解を踏まえることにより, 次世代の情報通信ネットワークやシリコンフォトニクスを実現する高性能光集積回路や新概念光素子の基盤技術が確立されるものと期待している。

本書は, この分野を初めて勉強する学部学生や大学院学生のみならず, 企業における研究開発者, 設計技術者の諸氏にも十分役立つ内容になっているものと確信する。末筆ながら, 各章の執筆を担当された著者の方々のご尽力に厚く御礼申し上げるとともに, 本分野の今後の発展を祈念する。

(荒川 泰彦)

# 第1章

## 電磁場解析を用いた 回折光学素子設計と 応用システム

### 1 はじめに

近年の増え続ける大容量の情報の高速伝送・処理に向けて、光を媒体とするフォトニックネットワーク、光情報処理の必要性が高まり、実用化に向けた全光システムの開発が急がれている。これらの実用システムに不可欠な光機能デバイスとして、従来からのレンズやプリズムなどの屈折光学素子に代わり、分岐・合波・結像・波面変換やこれらの複合機能を持ち、光の回折現象を効果的に利用した小型・薄型・軽量な微細回折光学素子（Diffractive Optical Element : DOE）が注目されている<sup>1)</sup>。

DOEの研究開発は、ニュートンの分光素子の提案にはじまり、ルーリングエンジンによる高精度格子作製に向けての長い歴史を持っている<sup>2)</sup>。さらに1962年のホログラフィ技術の導入とフォトレジスト感光材料の開発、その後のバイナリ技術の導入、EB描画法などにより、飛躍的な発展があった<sup>3-5)</sup>。この間には著者らを含め多くの研究者により設計・作製に種々の手法が検討され、実用的なDOEデバイスが作り出されてきている<sup>6-9)</sup>。一方、最近では、半導体の超微細加工技術とコンピュータの進展を背景として、波長以下の周期構造や波長の数倍の深溝構造などの高精度なデバイスの作製が容易となってきた<sup>10)</sup>。このような微細構造による光波伝搬の解析には、電場・磁場を考慮した電磁場解析が必要であるが、解析的な厳密解は存在しないので、実際

の構造を考慮し、コンピュータを駆使した数値的な手法が用いられている。

一方、これまででは、連続光を対象とした研究が一般的で、解析も周波数領域で実施される事が多かったが、最近の光エレクトロニクスの進展に伴い、時間領域での解析を必要とする問題が増えてきている。この問題の数値解析法として有限差分時間領域 (Finite-Difference Time-Domain: FDTD) 法がある。この手法は Maxwell 方程式を直接、時間を追って、数値的に解いていくもので、解析対象とする構造の制限はほとんどなく、非周期構造や非線形光学などにも適用可能である。本書では、主として、この FDTD 法を用いた解析についてのレビューが展開される。

そこで本稿では、DOE の電磁場解析の数値計算手法のうち、屈折率変調格子および微細マルチレベル格子の解析に適した厳密結合波解析 (Rigorous Coupled-Wave Analysis: RCWA) 法の手法について述べる。さらに、著者らが構築した RCWA の数値解析プログラムを用いた回折光学素子の設計とその応用システム例について紹介する。

## 2

## DOE の数値解析法

光は波長の短い電磁波であり、そのふるまいは Maxwell 方程式により記述される。しかし、この方程式は等方性媒質で電荷が存在せず、誘電率・透磁率が位置の関数ではないという仮定では、光波をスカラー量として取り扱うことができる。スカラー解析法には平面波展開法と Fresnel-Kirchhoff 回折公式の 2 つの手法がある<sup>11)</sup>。平面波展開法はフーリエ級数展開を用いて格子構造を解析するため周期構造に適しており、Fresnel-Kirchhoff 回折公式は非周期構造に適している。

周期構造が入射光の波長に近くなると入射光の偏光状態が素子の特性に大きく影響するので、Maxwell の電磁場方程式を厳密に解く電磁場理論を導入しなければならない。したがって、回折現象に基づく光波のふるまいを正確

に数値解析するためには、周期 $\Lambda$ と波長 $\lambda$ の関係により手法を選ぶ必要がある。

周期構造の厚みに関しては（1）式のQ値がその指標とされている。

$$Q = \frac{2\pi D}{n_0 \Lambda^2} \quad (1)$$

DOEの電磁場解析は、Maxwell-Helmholtzの方程式の境界値問題として定式化できる。この問題には解析的な厳密解は存在しないため、特性解析には半解析的あるいは数値的な手法を用いる。手法は大別すると、①モード法、②積分方程式法、③微分方程式法、④FDTD法、⑤その他、に分けられる<sup>12, 13)</sup>。微分方程式法は構造をフーリエ級数展開することで計算時間を短縮させることができたため、周期構造における光波解析に大変有利な数値解析法であるといえる。この手法はさらに差分公式を用いる微分方程式法と固有モードを用いる微分方程式法に分類できる。前者は格子領域を多層に分割し、各層内の電磁界を空間高周波で展開し、このとき導かれる常微分方程式を差分公式に基づき数値的に解く手法である。この解法により、深い溝形状をもつ格子や金属格子の問題に対して安定した数値計算を実行できる。それに対し、後者の固有モードを用いる微分方程式法は前者と同様に格子領域を多層分割した上で、格子断面の形状を階段近似し、各層内では誘電率の素子厚みの方向に変化がないと仮定すれば、各層の電磁界はMaxwell方程式の固有モードで展開できる。この解法では、展開する回折波や固有関数の表現式の違いによっていくつかの解法が提案されているが、その中で代表的なのはRCWA法で、平面格子、表面レリーフ格子、異方格子や体積型複合素子などに適用されている<sup>14)</sup>。モード近似とは反対に、主に異なった回折次数間の結合効果を考慮している。

DOEの特性解析に多く用いられる手法にRCWA法とFDTD法が挙げられるが、先に述べた解法の違いから適用対象は異なる。均一な媒質の周期構造にはRCWA法が適しており、複雑な溝形状や不均一な媒質で構成される

DOEの問題を取り扱う場合や、超微細DOEやフォトニック結晶の構造中の光波伝搬を逐次的に可視化するなど時間応答解析を行う場合にはFDTD法を使用する必要がある。ただし、FDTDの手法ではMaxwell方程式を直接差分法で解くため、対象計算時間と計算機の記憶容量への負担が大きくなることから電磁波の波長に比べて遙かに大きい領域の解析は困難である。同様の理由から、対象とする素子構造の大きさや対象物の間隔が使用する電磁波の波長に比べて大きい場合にはRCWA法の使用が適しており、微細回折格子、近接場光学など構造が波長に比べて同程度の場合にFDTD法の適用が有効である<sup>15, 16)</sup>。

以上の数値解析の手法の特徴から、著者らは対象とする屈折率変調格子および微細バイナリ光学素子の光波解析の手法としてRCWA法に着目した。

## 3

## RCWA の理論

### 3.1 RCWAに基づく周期構造中での光のふるまい

光の入射面をxz平面とし、xy平面に平行で、x方向にのみ周期 $\Lambda$ を持つy方向に一様な1次元透過型回折格子に、直線偏光を持つ平面波が入射したときの回折波のふるまいをRCWA法により導く。RCWAの理論は1980年代初頭にM.G.MoharamとT.K.Gaylordにより提案されている<sup>17)</sup>。電場を入射面に垂直な成分と平行な成分に分けて考える。前者は光の入射角によらず電場は境界面内のY成分のみとなりTEモードとよばれる。後者は磁場がY成分のみとなり、TMモードとよばれる。

RCWA法では対象となる構造を第Ⅰ層：入射・反射領域、第Ⅱ層：格子領域、第Ⅲ層：透過領域の3つに分けて光のふるまいを扱う。ここで数値計算は次の2つのステップに分けて行う。

- (1) 図1のようにDOE全体の構造を深さ方向に $L$ 枚の層に分割し、各層 $d_i$ における厳密な電磁場の記述を行う。各層における周期構造中の電磁場のふるまいをMaxwell方程式により平面波の重ね合わせの波動方程式で表現し、深さ方向に対する固有モードの結合方程式を得、これを解く。この結果、各層における固有モードの線形結合として、電磁場の一般解が求められる。また、入射／反射領域、透過領域における固有モードと線形結合である一般解を求める。屈折率分布は $z$ 軸方向には一様で、 $x$ 軸方向に変化している。そのため、格子形状は屈折率分布を考慮し、比誘電率分布を用いたステップ状の周期関数で表すことが可能である。これを各層に関して考慮する。
- (2) 電磁場に対する境界領域を入射・反射領域と第I層間、第I層と第II層間、…、最終層と透過領域、に関して求める。これにより全領域のモー

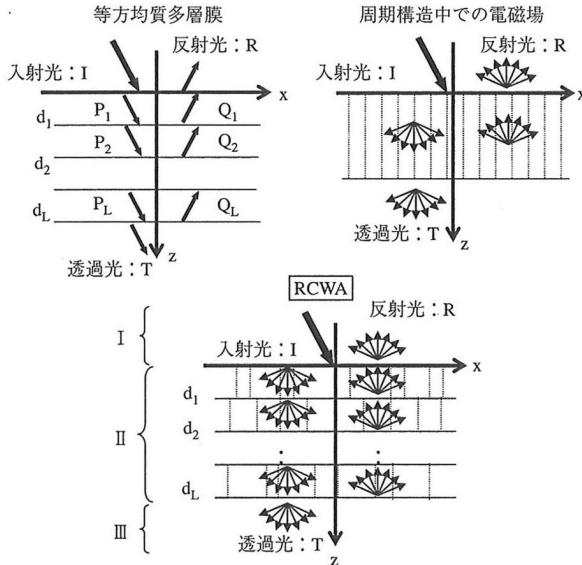


図1 RCWAの光波伝搬モデル