まえがき

本書では電磁波解析手法の一つである幾何光学的回折理論について，その考え方，使い方について，最近の応用例を含めて解説する．幾何光学的回折理論は，geometrical theory of diffraction の日本語訳であり，GTD という略称で呼ばれることが多い．本理論は使用する電磁波の波長が，取り扱っている物体の寸法に比べて十分小さいという前提で解析する高周波漸近解析手法の一つであり，偉大な先人たちの発見した電磁波に関する物理的な諸法則・原理と巧みな数学的取扱いによって導かれている．

幾何光学的回折理論によれば，幾何光学的な表現を拡張することにより回折波を表すが，その最終的な定式化の結果は，回折現象が局所的な形状や媒質で決定でき，物理的に明確な解釈を可能とする形に表現できる．こうして求めた表現は，後で詳しく調べるように幾何光学的な影との境界付近で発散する．これは任意の観測方向では使えないという意味では欠点であるが，影境界付近では簡単な幾何光学的表現では表現できない遷移領域であるという注意を喚起しているともいえる．もし最初から一様漸近解を使って電磁界を表現していたら，明解で美しい表現に気が付かなかったかもしれない．この点で幾何光学的回折理論の提唱者であるケラー (Keller, J. B.) が導いた回折波の簡明な一般表現は，素晴らしい業績である．

高周波漸近解の利点は，局所的な現象の組合せで界を組み立てることができることである．例えば，厳密な解析が困難となる複雑な形状をした物体による散乱問題を取り扱うとき，反射・透過・回折現象それぞれを局所的に抽出し，必要に応じてそれらの組合せで合成界を表すことができる．また，計算精度や計算時間を考えながら解析も可能である．もちろん使用に当たっては，波数の逆べき級数展開を用いた発散級数であることを念頭において解析を進める必要が

ある．

現在の無線通信は，技術発展に伴って大容量の通信データを効率よく搬送するため，搬送周波数を高くし，高度化した変調方式を使用している．こうした無線通信環境における高周波電磁波の放射･散乱現象の解析には，電子計算機の大容量化，処理速度の高速化，ならびに低価格化に伴って有限要素法や FDTD 法などに代表される電磁界の数値解法によるシミュレーションが，手軽に行えるようになってきた．しかし，こうしたシミュレータによる解析結果は，通常単なる数字の羅列で出力されるだけであり，その結果が妥当な計算結果であることを見分けるのはなかなか難しく，豊富な知識と経験を基にした正しい物理現象の理解が必要である．

こうした物理的な現象の理解には，GTD のような漸近解は欠かせない．今後の電磁界解析は，万能な解析手法を見つけてそれを用いるというより，いろいろな手法の長所を組み合わせた混成解析手法の考案が必要になると思われる．幾何光学的回折理論の考え方を基に，今回本書で取り上げることのできなかったさまざまな拡張，改良や混成解法も報告されており，今後もさらなる展開が期待できることであろう．

本書をまとめるに当たり，多くの文献を参考にさせていただいた．特に学生時代からお世話になった元静岡大学の本郷廣平先生からは，正式に発表されていない先生の研究ノートや貴重な文献資料をいただいた．ここに厚くお礼申し上げる．本書は，電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究専門委員会が主催する，アンテナ・伝搬における設計・解析手法ワークショップのために書き下ろしたテキストを基に，加筆修正したものである．この講習会の開催ならびに本書の作成に当たり，ワークショップ実行委員会の委員の方々からは，いろいろなご意見をいただいた．ここに感謝申し上げる．

2015 年 2 月

白　井　　宏

目　　　　　次

1.　序　　　　論

2.　漸　近　展　開

3.　幾何光学（GO）

4.　物理光学（PO）

5.　幾何光学的回折理論（エッジ回折）

6.　幾何光学的回折理論（表面回折）

7.　GTD の問題点とその拡張

8.　GTDの応用例

1 序　論

Dixitque Deus: 'Fiat lux!' Et facta est lux.

神は言われた.「光あれ！」すると光ができた.（旧約聖書 創世記）

幾何光学的回折理論は，幾何光学的な解釈を回折した波動にも使えるように拡張した理論である．光も電磁波の一部であることが，**マクスウェル** (Maxwell, J. C.) によって 19 世紀に示されるまで，両者はそれぞれ異なるものとして扱われ，可視光線に代表される光学の理論は，電磁波の理論よりも早くから発展してきた経緯がある．望遠鏡に使われたレンズの理論等は，もし光が電磁波ということがわかっていたら，これほど発展しなかったであろうといわれている．

1.1　光 学 理 論

古典的な光学は，大別して幾何光学と波動光学に分けられる．人間の眼にどのように像が映るのかといった視覚の研究に関連して，紀元前 400 年頃の古代ギリシャ時代には，眼から炎のような光が出ているという能動的な考え方が**プラトン** (Plato) によって提唱された．その後**ユークリッド** (Euclid) （紀元前 300 年頃）や**プトレマイオス** (Ptolemy) （2 世紀頃）らにより，視線が直進，反射，屈折するとした**幾何光学** (geometric optics あるいは geometrical optics; GO) が作られた.

幾何光学では，まさに光を粒子と考えて，その粒子が飛んでいく軌跡を**光線**と

1.5 本書の構成

GTD の大まかな歴史に沿った本書の構成は，**図 1.1** のようになる．続く第 2 章では，波数 k を用いた漸近展開と呼ばれる級数展開について，その性質を調べる．この展開は波数 k が大きいとき，いわゆる高周波においては初項だけ，あるいは数項の和を用いるとかなり精度の高い近似となっているが，さらに項を加えていくと，正しい解からしだいに離れ，発散する性質をもつ．この高周波漸近展開を得るために使われる**鞍部点法**（あんぶ）と呼ばれる積分の近似解法について学ぶ．

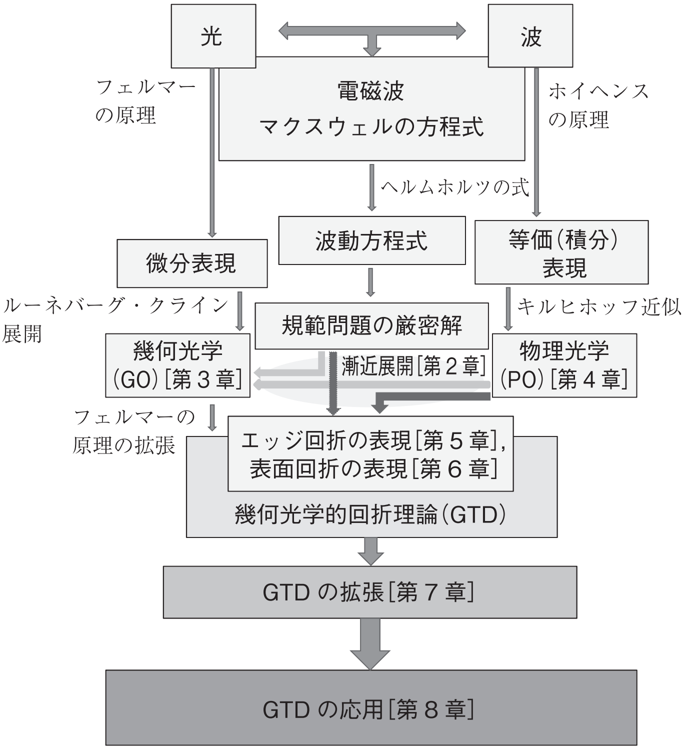

図 1.1　GTD の歴史に沿った本書の構成

第 3 章では，幾何光学について解説する．電磁波が満足するマクスウェルの方程式から，漸近展開を利用して高周波の電磁波が満足すべき近似式を求め，その初項が従来の幾何光学と呼ばれる光の性質と同様な性質をもち，光学の伝搬，反射，透過等の知識との関連で電磁界を表現する方法について調べる．続く第 4 章では GTD よりも歴史が古い物理光学（キルヒホッフ）近似について調べる．具体的に二次元導体楔による平面波の散乱について，等価電磁流からの放射積分の形で表された散乱界を定式化し，その積分表示から漸近解を導出することによって，幾何光学波や回折波の導出について考察する．

第 5，6 章は，幾何光学を回折現象にも適用できるように拡張するために，厳密に解くことのできる基本形状である導体楔と導体円筒による電磁波の回折問題を調べる．エッジで励振されるエッジ回折波，ならびに滑らかな表面に沿って伝搬する表面回折波の表現が，その波の伝搬経路に沿った局所的な情報から求められることを示し，ケラーの提唱した GTD の基本について考える．

第 7 章では，物理的に明解な解釈が可能な形で表現できる GTD の問題点について調べ，それらの解決法となり得る拡張された UTD，等価端部電磁流法や高次の回折波の表現について調べる．

第 8 章では，電磁波散乱や伝搬についての種々の問題に対して GTD を応用して適用した例について紹介する．近年，GTD についての多くの文献が出版されているので，こうした文献も参考にされたい[19)~26)]．

以下，本文では，電気工学系の記述に倣い，虚数単位は j を，時間因子 $\exp(j\omega t)$ を用いる．

‘Mehr Licht!’

もっと光を！（Johann Wolfgang von Goethe, 1749–1832）

索　　　引

◇　◇

—— 著者略歴 ——

1980 年　静岡大学工学部電気工学科卒業
1986 年　アメリカ合衆国ポリテクニック大学大学院博士課程修了（電気工学専攻），
　　　　Ph. D.
1986 年　ポリテクニック大学研究員
1987 年　中央大学専任講師
1988 年　中央大学助教授
1998 年　中央大学教授
　　　　現在に至る

幾何光学的回折理論
Geometrical Theory of Diffraction

2015 年 4 月 30 日　初版第 1 刷発行

検印省略

著　　者　白(しら)　井(い)　　宏(ひろし)
発 行 者　株式会社　コ ロ ナ 社
　　　　　代 表 者　牛 来 真 也
印 刷 所　三 美 印 刷 株 式 会 社

112–0011　東京都文京区千石 4–46–10
発行所　株式会社　コ　ロ　ナ　社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan
振替 00140–8–14844・電話(03)3941–3131(代)
ホームページ　http://www.coronasha.co.jp

ISBN 978－4－339－00877－7　（高橋）　（製本：SBC）

Printed in Japan