光と色彩講座（第 5 講）
J. Jpn. Soc. Colour Mater., **89**〔3〕，93-97（2016）

波動や電磁波としての光の解析

岡本　卓*,†

*九州工業大学大学院情報工学研究院　福岡県飯塚市川津680-4（〒820-8502）
† Corresponding Author, E-mail: okamoto@ces.kyutech.ac.jp

（2015年7月30日受付，2015年9月5日受理）

要　　旨

媒質中の光の伝搬および散乱は，色材を扱う分野をはじめとして多くの分野で重要な研究テーマとなっている。その解を与える光学理論は，幾何光学から量子光学まで，解析対象の性質に応じてさまざまなものが構築されてきた。波長に比べて十分に大きなスケールしかもたないものであれば，光を光線とみなして反射・屈折を議論すれば十分である。しかし，小さなスケールになるとそれでは説明が付かない現象があらわれる。この場合，光をスカラー波やベクトル波として取り扱う必要が生じる。本稿では，光を波動や電磁波として解析するための理論的な取り扱いについて説明する。また，数値解析を行うための手法の一つである，時間領域差分法を紹介する。

キーワード：波動光学，電磁工学，マクスウェル方程式，時間領域差分法

1. はじめに

現在，光のさまざまな現象を理論的に，あるいは計算機上で取り扱うことのできる数多くの解析手法が存在する。その解析手法は，理論的には大きく四つに分類することができる。光は電磁波であるため波動的性質をもつ一方，光子という基本単位をもつ粒子性も合わせもっている。この光の粒子性も組み入れた理論体系が量子光学（quantum optics）である。量子光学は光学現象のあらゆる状態に対応できるが，光の波動性のみで現象を記述できるのであれば，より波動に特化した理論体系を用いたほうが便利である。このための理論体系として，電磁光学（electromagnetic optics）が体系化された。この理論は電磁波をあらわすマクスウェルの方程式を基本とし，電場ベクトルと磁場ベクトルで光学現象をあらわすものである。われわれの目にする現象のほとんどは，電磁光学で記述可能である。

電磁光学による解析は応用範囲が広いが，ベクトル量を取り扱うため，多少の複雑さをともなうことが避けられない。もし，電磁場ベクトルの異なる偏光成分同士が互いに影響を与えないのであれば，現象を記述するのにベクトルの一成分のみを考えれば十分である。このように，電磁波をスカラー量であらわす理論体系を波動光学（wave optics）という。回折や干渉，なめらかな粗面からの反射など，波動光学で記述できる現象は数多く存在する。さらに，対象物の微細構造が光の波長に比べて十分大きい場合，光を光線として扱うことが可能になる。これは，波動光学において波長を無限小の極限にもっていったことに対応する。この場合の理論体系を幾何光学（geometrical optics），あるいは光線光学（ray optics）という。幾何光学はコンピュータ・グラフィックスやレンズ設計などに活用されている。また，虹の形成も幾何光学で説明できる。

本稿では，この四つの理論体系の中でも，多くの現象に適用でき，なおかつ解析も比較的容易な波動光学および電磁光学を中心に，そこでの基本的な光の取り扱いについて説明する[1-4]。さらに，電磁波のベクトル的取り扱いが可能な計算手法の一つ，時間領域差分法についても述べる。また，電磁光学の応用例として，塗料や化粧品等に含まれる粉体微粒子からの光散乱を挙げる。

2. 光波の表示法

波動光学では電場をスカラー量として考える。光を波として扱う場合，単色光は調和波となる。簡単のため，一次元の波を考えると，光波の電場は

$$E(x,t)=A\cos(kx-\omega t+\phi) \quad \cdots\cdots(1)$$

とあらわされる。ただし，xは位置，tは時間，Aは振幅，kは波数（$k=2\pi/\lambda$，λ：波長），ωは角周波数（$\omega=2\pi\nu$，ν：周波数），ϕは初期位相である。$kx-\omega t+\phi$が電場の位相成分である。式（1）より，調和波は空間的・時間的ともに正弦波状に変化していることがわかる。これを三次元空間に拡張すると，

$$E(\boldsymbol{r},t)=A\cos(\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}-\omega t+\phi) \quad \cdots\cdots(2)$$

となる。ただし，$\boldsymbol{k}$は波数ベクトル（$|\boldsymbol{k}|=2\pi/\lambda$，向きは波の進む向き），$\boldsymbol{r}$は位置ベクトルである。$\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}$＝一定を満たすとき，$\boldsymbol{r}$ベクトルの先端はすべて一つの平面上に存在する。すなわち，時間tを固定すると，位相がある一定の値をとる場所は三次元空間内の一つの平面になる。したがって，式（2）は等位相面

〔氏名〕おかもと　たかし
〔現職〕九州工業大学大学院情報工学研究院システム創成情報工学研究系 教授
〔趣味〕映画鑑賞，スキー
〔経歴〕1986年北海道大学大学院工学研究科電子工学専攻修了。1986年日立製作所入社。1988年北海道大学応用電気研究所助手。1993年博士（工学）。1995年防衛大学校電気工学教室講師。1998年九州工業大学情報工学部助教授。2006年同教授。

© 2016 Journal of the Japan Society of Colour Material