

## 光散乱解析による不透明な試料の偏光計測の可否判定

光科 太田幸宏\*

## Availability judgments for polarization measurements using light scattering analysis on opaque samples

OHTA Yukihiro

In this paper, the authors propose applying a light scattering analysis to select an appropriate light source wavelength with the aim of visualizing the residual stress in opaque resins. The photoelastic method can be used to visualize the residual stress of transparent resin products without destruction and contact. To apply this method to opaque resin products, it is important to select an appropriate light source wavelength. Therefore, the amount of light transmitted through the sample is predicted by performing light scattering analysis based on the Monte Carlo method in order to select an appropriate light source wavelength. In this study, the authors performed a basic verification by using a model constructed with a glass cell filled with pure water and dispersed particles. The results demonstrated that the measured values agreed with the analyzed values. In addition, the same model was used to create a polarization measurement propriety determination diagram which selected the light source wavelength and the particle concentration as variables. The effectiveness of the propriety determination diagram is also discussed based on the polarization measurement results in this report.

Keywords : Photoelastic method, Monte Carlo method, Light scattering analysis

不透明な樹脂内部の残留応力を可視化することを目的として、適切な光源波長の選定に光散乱解析を応用することを提案する。光弾性法は非破壊・非接触で透明な樹脂製品の残留応力を可視化することができる。この方法を不透明な樹脂製品に適用するには、適切な光源波長の選定が重要となる。そこで、モンテカルロ法による光散乱解析で試料を透過する光量を予測し、適切な光源波長を選定する。

本研究では、ガラスセルに粒子が分散した純水を満たしたモデルで基礎検証を行い、実測値と解析値が一致することを示した。また、同モデルを用いて、光源波長と粒子濃度を変数として偏光計測可否判定図を作成した。

また、偏光測定結果に基づいて、可否判定図の有効性も議論します。

キーワード：光弾性法、モンテカルロ法、光散乱解析

## 1 はじめに

近年、製品の軽量化のために金属・ガラスからプラスチックへの代替が進んでいる。その樹脂製品の品質管理において、破損の原因となる製造時の残留応力の把握は重要である。非破壊・非接触で残留応力を把握する手法として、偏光を利用した光弾性法があり、透明な樹脂製品の検査に応用されている<sup>1)</sup>。しかし、工業製品には不透明な樹脂が多用されており、透明な樹脂製品用の検査機器で用いている可視域の光で

は十分な透過光量が取得できない。そのため、不透明な製品に光弾性法を適用するには、適切な光源波長の選定が重要になる。そこで、不透明な樹脂を顔料やフィラーなどの散乱体が含有する試料に見立て、モンテカルロ法による光散乱解析で試料を透過する光量を予測することを提案する。

本研究では、ガラスセルに粒子が分散した純水を満たした解析モデルを用いて、光散乱解析で予測した正透過率と実測した正透過率の比較検証を行った。ま

\* 現 機械電子科

た、同モデルを用いて、光源波長と粒子濃度を変数として偏光計測の可否判定図を作成し、測定システムの光源波長の選定を行った。

## 2 方法

### 2.1 光散乱解析による透過率の予測

図1はモンテカルロ法による光散乱解析のフローチャート、図2は光子の挙動のイラストである<sup>2)</sup>。1光子ずつ媒質に照射し、初期で与えたエネルギーが、散乱や媒質透過による吸収で設定した閾値まで減少するまで、あるいは、媒質から反射または透過するまで、光子の挙動を追跡する。これを多くの回数行うことで、透過率、反射率および吸収率の予測に利用することが可能となる。そのうちのひとつである透過率の予測は、透過したときに光子が持っていたエネルギーの和を、初期で与えたエネルギーに解析回数を掛けた値で割ることで求める。モンテカルロ法は乱数を活用する手法である。この光散乱解析では、図1中の①光子が移動する距離の決定、②粒子と衝突したときに新たに光子

が進む方向の決定、③光子が媒質の境界に到達するときに反射して媒質に戻るのか、透過して次の媒質に進むのかの決定に乱数を活用する。

### 2.2 試料と解析モデル

モンテカルロ法による光散乱解析を行うためには、粒子径、光の波長、媒質や粒子などの複素屈折率、および、粒子濃度といった物性値を入力する必要がある。本研究では、解析値と実測値を比較検証ができるように、物性値が全て既知のもので試料を用意する必要がある。そこで、ガラスセルに粒子径が揃ったポリスチレンの標準粒子（3200A モリテックス製）が分散した純水を満たした試料を作製した。図3に、試料の外観と解析モデルを示す。この試料を用いて自記分光光度計（UV-3150 島津製作所製）で正透過率を実測し、解析モデルを用いて光散乱解析で正透過率を予測した。解析による正透過率は、モデルに対して垂直に光子を照射したとき、その進行方向が変わらない、つまり、純水に分散した粒子に衝突しないでモデルを透過した光子を用いて計算した値である。

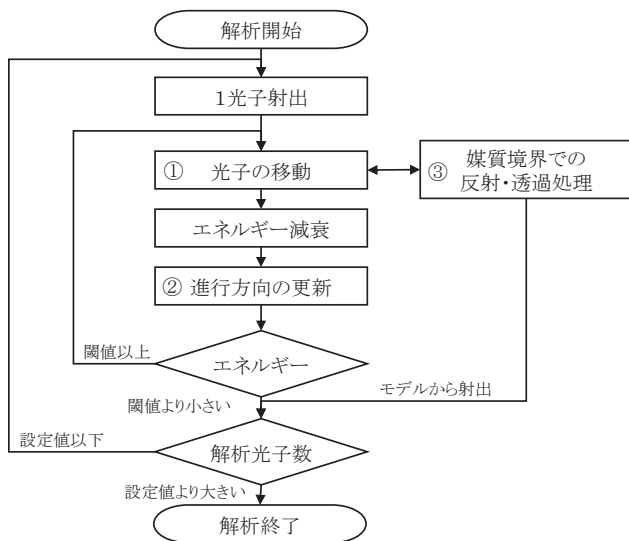


図1 光散乱解析のフローチャート

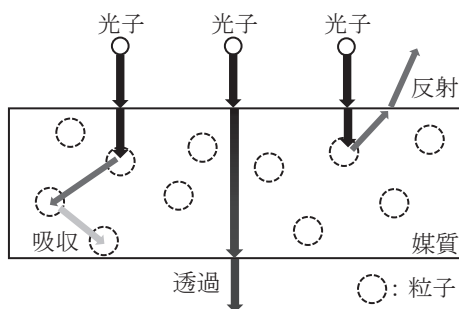


図2 光子の挙動のイラスト

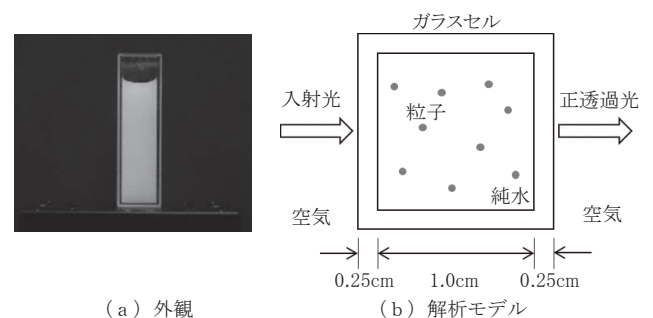


図3 試料

## 3 結果および考察

### 3.1 光散乱解析による正透過率の予測

図4に、光散乱解析の入力値として必要な、異なる粒子濃度で作製した試料の物性値を示す。図中 (a) の物性値一覧の中で、物質の複素屈折率は光源波長により異なるため、(b) および (c) に横軸を光源波長としたグラフで示す。複素屈折率とは、光がその物質を透過するときの速度に関する屈折率と、光がその物質を透過するとき吸収される度合いに関する消衰係数からなる物性値である。図5に、光散乱解析で予測した正透過率と、自記分光光度計で実測した正透過率を示す。図5において線で示す実測値は、光源の波長の増加に伴い正透過率も増加し、波長 0.9 $\mu$ m 付近から減少に転じている。これは、一般に波長が大

きくなるほど、粒子による散乱の影響は小さくなるが、図4 (b) に示すように純水の光の吸収に寄与する消衰係数が波長 0.9 $\mu\text{m}$  付近から大きくなるのが原因である。図5において記号で示す解析値は、実測値の増加から減少に転じる変化によく一致していることが確

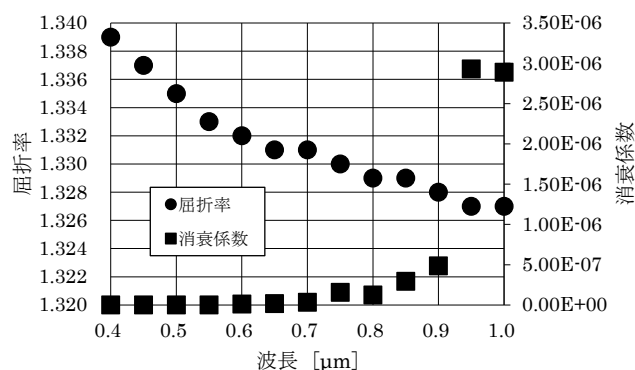
認できる。これより、光散乱解析が試料の正透過率の予測に有効であることが検証できた。

### 3.2 測定システムの光源波長の選定と検証

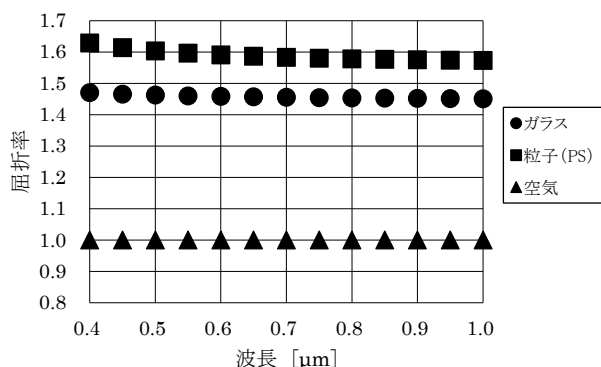
測定システムの光源波長を選定するため、図6の物性値を入力して光散乱解析を行った。光源波長の選定を目的としているため、図4と比較して、入力値の光源波長の範囲は2倍に拡大した。この解析結果を用いて、測定システムのSN比を考慮し正透過率1%を閾値として、1%以上を偏光計測可能領域、1%未満を偏光計測不可能領域に2分割する偏光計測の可否判定図を作成した(図7)。図5で見られた長波長領域での正透過率の低下は、図7でも確認できる。これも図6 (b) に示す長波長領域での純水の消衰係数の増加が原因である。図7より、波長 1.2 $\mu\text{m}$  付近の光源が、他の波長と比較して、粒子濃度が高くても1%以上の正透過率が得られるため、この解析モデルにおいて最適な光源波長と考えられる。

粒子径	203[nm]
光源波長	0.4~1.0[ $\mu\text{m}$ ]
粒子濃度	1 : $4.15 \times 10^{-5}$ 2 : $7.41 \times 10^{-5}$ 3 : $1.56 \times 10^{-5}$
物質の複素屈折率 <sup>3)</sup>	(b)、(c)参照

(a) 物性値一覧



(b) 純水の複素屈折率



(c) ガラス・粒子・空気の屈折率  
※ 消衰係数はゼロとする

図4 実測値との比較用光散乱解析の入力値

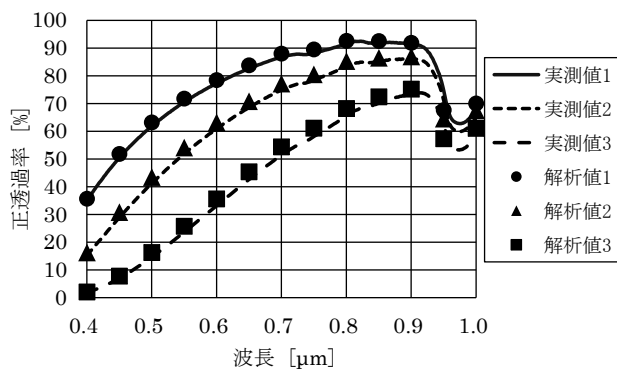
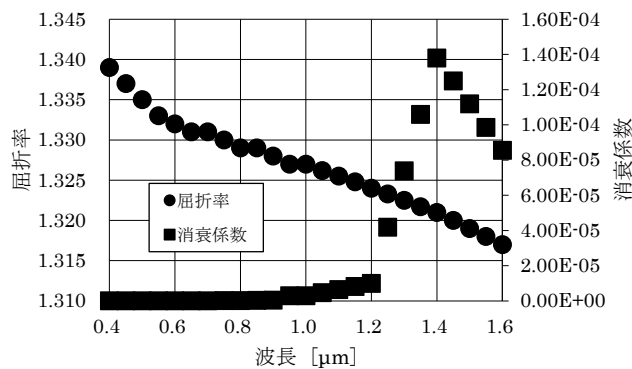


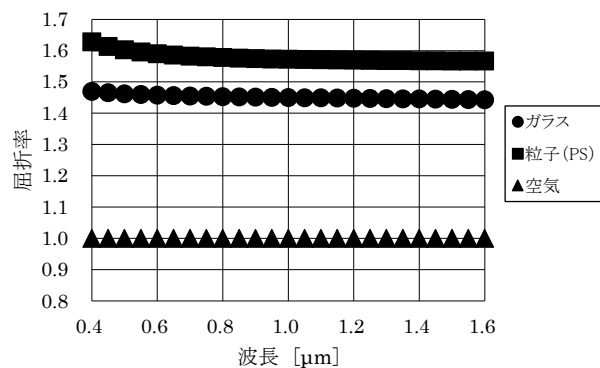
図5 実測値と解析値の比較

粒子径	203[nm]
光源波長	0.4~1.6[ $\mu\text{m}$ ]
粒子濃度	0.0001~0.01
物質の複素屈折率 <sup>3)</sup>	(b)、(c)参照

(a) 物性値一覧



(b) 純水の複素屈折率



(c) ガラス・粒子・空気の屈折率  
※ 消衰係数はゼロとする

図6 光源波長選定用光散乱解析の入力値

図7中、光源波長  $0.9\mu\text{m}$  において、可否判定の境界線付近となる偏光計測可能領域に属する粒子濃度  $0.002\text{m}^3/\text{m}^3$  の試料を作製し、試料内での光の散乱による偏光計測の影響を調べた。偏光計測は、図8の測定システムを用いて検光子回転法<sup>4)</sup>で行った。光源は波長  $910\text{nm}$  のLED照明、受光器は  $\text{NA}=0.045$  のテレセントリックレンズ (MML1-HR110 モリテックス製) と露光時間を制御できる取得画像サイズ  $640 \times 480$  のモノクロカメラ (XCD-SX910 ソニー製) を用いた。図9に、偏光計測した結果を検光子の角度毎の光量を極座標系でプロットしたグラフで示す。図9から、試料の有無によらず、偏光計測した8の字状の形状および傾きがほとんど変わらないことから、露光時間の増加による影響、および、試料内部の粒子による散乱光の影響をほとんど受けないことが確認できる。このことから、光散乱解析を用いて作成した偏光計測の可否判定図は測定システムの光源波長の選定に有効であることが検証できた。

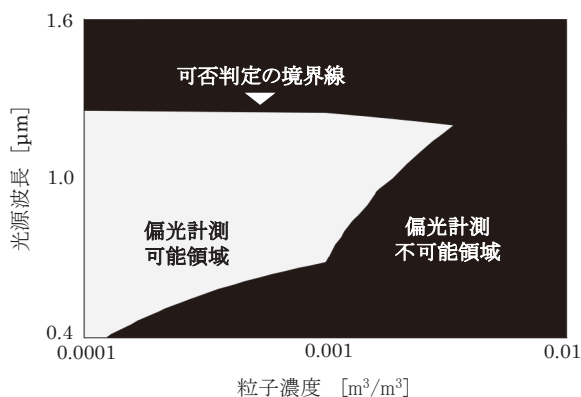


図7 偏光計測の可否判定図  
※閾値：正透過率1%

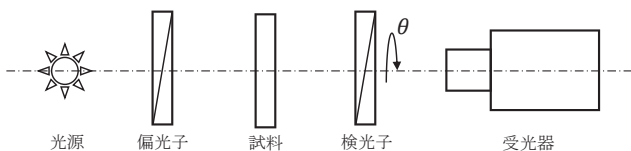


図8 測定システム

試料	なし	あり
露光時間	0.0625 [s]	1.0 [s]
取得画像の一枚		
光量波形		

図9 偏光計測結果

#### 4 まとめ

光散乱解析に必要な粒子径や複素屈折率などの物性値が用意できれば、偏光計測で重要な計測対象を正透過する光量の予測が可能であることを、ガラスセルに粒子が分散した純水を満たした試料の実測した正透過する光量と比較検証することで確認した。

物性値の一部を変数として光散乱解析で正透過する光量を予測することで、測定システムの光源波長の選定に応用できる偏光計測の可否判定図を作成することが可能となり、偏光計測可能領域に属する粒子濃度の試料を実測することで、この手法の有効性を確認した。

#### 参考文献

- 1) 高橋勉 他：「LCD／光学材料における偏光・複屈折の制御・測定と応用」，第1版（㈱技術情報協会，東京），pp.195-310（2008）.
- 2) Lihong Wang, Steven L. Jacques：Monte Carlo Modeling of Light Transport in Multi-Layered Tissues in Standard C, (1992).
- 3) M. N. Polyanskiy：Refractive index database. (<https://refractiveindex.info>).
- 4) 中楯末三 他：「学生実験のための検光子回転法による偏光測定」，東京工芸大学紀要 Vol.18 No.1, pp.17-27（1995）.