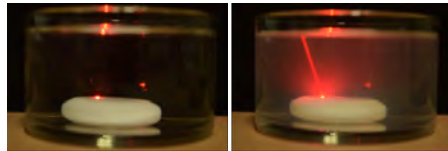


実測に基づいた散乱位相関数モデルの検証

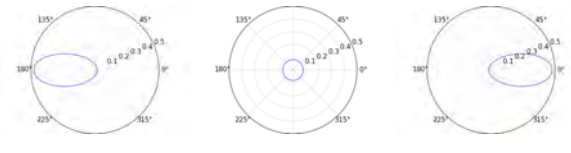
櫛田 貴弘^{1,a)} 船富 卓哉^{1,b)} 久保 尋之^{1,c)} 向川 康博^{1,d)}



散乱なし

散乱あり

図 1: 散乱の有無による見え方の違い.



(a) $g = -0.5$

(b) $g = 0$

(c) $g = 0.5$

図 2: HG 位相関数のパラメータ g による散乱指向性の違い.

1. はじめに

牛乳や石鹸を溶かした水のような媒質中では、チンダル現象と呼ばれる光の通り道が観測できる現象が起こる。この光の散乱現象を利用して、物体の幾何形状や反射特性を計測する研究が行われている。例えば、Evrenci ら [1] は光が物体表面に到達し反射する様子を散乱を利用して観測することで、物体の幾何形状と反射特性を同時に推定している。

散乱が起こる媒質と、散乱の起こらない媒質にレーザー光を入射した際に観測される見え方の例を図 1 に示す。このように、散乱の起こる媒質中では物体表面での反射位置が観測でき、また物体の反射特性に応じて異なった光の広がり方が観測される。この光の広がり方は媒質そのものにも影響されることが知られている。媒質の散乱特性そのものを計測する研究として、Narasimhan ら [2] は牛乳やコーヒー、ワイン等の様々な液体について散乱特性の推定を行った。

以上の研究では、散乱位相関数モデルとして Henyey-Greenstein (HG) 位相関数モデルを用いている。HG 位相関数モデルは元来、宇宙空間における星間物質が引き起こす散乱現象を論じたものであり [3]、牛乳など日常で観測される一般的な媒質の散乱位相関数を対象としたものではない。そこで本研究では、散乱位相関数を実測し、HG 位相関数モデルへ当てはめることでモデルの検証を行う。

2. 散乱位相関数モデル

Henyey-Greenstein (HG) 位相関数モデル [3] は次式で表される。

$$f_p(g, \theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{[1 + g^2 - 2g \cos \theta]^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

θ は光の進行方向に対する散乱方向の角度である。 $g \in [-1, 1]$ は散乱の指向性を表すパラメータで、 g が 0 に近い時は等方散乱となり、 g が 1 に近いほど前方散乱、 -1 に近いほど後方散乱となる。 g の違いによる指向性の違いを図 2 に示す。

3. 散乱位相関数の実計測とモデルの検証

3.1 散乱位相関数の実計測

さまざまな θ に対する散乱光強度を実際に観測することで散乱位相関数を計測する。チンダル現象を生じる媒質に平行化したレーザー光を入射させ、これを周囲からカメラで観測することにより、計測を実現する。本研究では媒質として水で希釈した牛乳を用いるが、カメラが空気中にある場合には境界面において屈折を生じる。そのため、 θ は入射したレーザーとカメラの光軸の成す角度では得られないため、屈折の影響を考慮して θ を算出する必要がある。また、 $\theta \approx 0$ では入射したレーザーがカメラに直接入射することになり、また $\theta \approx 2\pi$ ではカメラ自体が入射レーザーを遮蔽することになる。そのため、これらを直接観測することは難しいが、本研究ではレーザーがカメラに直接入射しない程度にできるだけ広範な θ で散乱光強度を観測できるように観測装置を構成した。具体的な観測や散乱光強度の取得について以下に述べる。

計測環境：散乱位相関数の計測環境を図 3 に示す。水で希釈した牛乳にレーザー光を入射し、散乱光を観測する。散

¹ 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

a) kushida.takahiro.kh3@is.naist.jp

b) funatomi@is.naist.jp

c) hkubo@is.naist.jp

d) mukaigawa@is.naist.jp

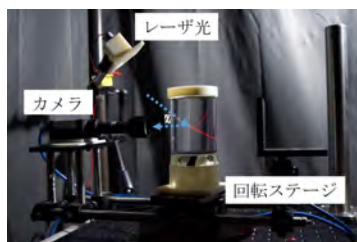


図 3: 計測環境

乱位相関数の θ に関する変化を観測するために、回転ステージにカメラを取り付け、周囲から観測する。容器には、観測方向による違いが生じないように円筒形のものを用いる。容器の境界による屈折の影響の計算を容易にするために、テレセントリックレンズを用いて平行な光学系を構成する。

画像の撮影：回転ステージに取り付けたカメラを回転させ、 0° から 360° まで 1° ごとに画像を撮影する。ノイズを低減するために、それぞれの角度について 5 枚撮影して平均を取る。観測画像における回転ステージの軸を予めキャリブレーションによって求めておき、軸が画像の中心を垂直に通るように補正する。得られた画像の例を図 4a に示す。

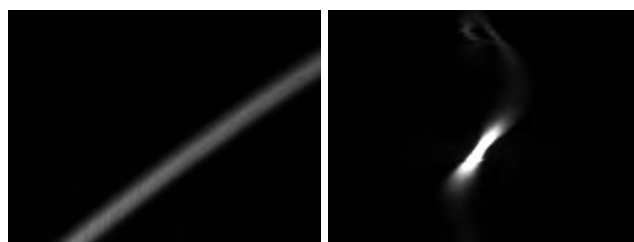
各観測方向の輝度値の取得：回転ステージに取り付けたカメラから撮影した時、観測対象のある 1 点は、撮影した角度ごとに縦に並べた画像（サイノグラム）上で \sin カーブを通る。つまり、サイノグラムに \sin カーブを当てはめることで、各観測方向から見た同一点の輝度値を取得できる。先の手順で得られた画像の特定の高さの画素を抜き出し、サイノグラムを作成する。ここで得られるサイノグラムは屈折の影響によって歪んだ画像となっている。そのため、水の屈折率を既知として屈折による歪みを計算し、サイノグラムの補正を行う。そして、補正後のサイノグラムに対し \sin カーブを当てはめ、 \sin カーブ上の輝度値を取得する。

散乱位相関数の角度の算出：散乱位相関数は光の入射方向に対する散乱方向の角度への散乱強度を表している。つまり、レーザー光の入射方向とカメラの観測方向のなす角度 θ を計算することで、散乱位相関数の角度を計算できる。観測画像からレーザー光の入射方向のベクトルとカメラの観測方向のベクトルを求め、これらの内積から、2つのベクトルのなす角度を計算する。

3.2 Henyey-Greenstein 位相関数モデルの検証

前節で得られた散乱位相関数の計測データを用いて、HG 位相関数モデルへの当てはめを行う。当てはめには最小二乗法を用い、計測データとモデルの二乗誤差が最小となるようにパラメータ g を推定する。

計測データと推定されたパラメータを用いて描画したグラフを図 5 に示す。推定された HG 位相関数のパラメータ



(a) 観測画像 (b) サイノグラム

図 4: 計測で得られた画像の例。(a) は右上から左下へ通過するレーザー光の散乱光を観測した様子、(b) は屈折補正後のサイノグラムである。

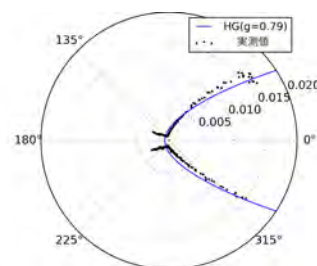


図 5: HG 位相関数モデルでフィッティングした結果。 $g = 0.79$ 。

は $g = 0.79$ であった。結果から、前方付近についてはモデルに合っているが、後方付近はモデルから大幅にずれていることが分かる。以上より、水で薄めた牛乳の散乱位相関数の実測値は HG 位相関数モデルとの誤差が大きいことが分かった。

4. おわりに

本研究では、散乱位相関数を実測し、HG 位相関数モデルへ当てはめることでモデルの検証を行った。その結果、実測で得られた水で薄めた牛乳の散乱位相関数は HG 位相関数モデルとの誤差が大きいことが分かった。今後の課題として、誤差の原因について、計測方法による影響も含め検討していく予定である。

謝辞

本研究は科研費 JSPS (26700013), 科研費 JSPS (15K16027) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] D. Evrenci, M. Iiyama, T. Funatomi, M. Minoh, "Shape and Reflectance from Scattering in Participating Media," International Conference on 3D Vision (3DV2013), June 2013
- [2] S. G. Narasimhan, M. Gupta, C. Donner, R. Ramamoorthi, S. K. Nayar, H. W. Jensen, "Acquiring scattering properties of participating media by dilution," ACM Transactions on Graphics (TOG), v.25 n.3, July 2006
- [3] L.G. Henyey, J.L. Greenstein, "Diffuse Radiation in the Galaxy," Astrophys.J., vol. 93, p.70-83 Jan 1941.