

# 高濃度散乱媒質中における非回折光生成範囲についての考察

シャフケティ アリフ<sup>1</sup>, 椎名 達雄<sup>1</sup>, 久世 宏明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>千葉大学大学院 融合理工学府 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33)

<sup>2</sup>千葉大学環境リモートセンシング研究センター (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33)

## Consideration on generating range of non-diffractive beam in highly scattering media

Xiafukaiti ALIFU<sup>1</sup>, Tatsuo SHIINA<sup>1</sup>, and Hiroaki KUZE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Science and Engineering, Chiba Univ., 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8522

<sup>2</sup> Center for Environmental Remote Sensing (CEReS), Chiba Univ., 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522

**Abstract:** Light propagation in highly scattering media such as nimbostratus or thick fog was limited. An annular beam as a lidar transmitter can propagate over a longer distance even when it goes through the atmosphere fluctuation. Because the annular beam can self-transform itself into a non-diffracting beam. We conducted the model experiment for scattering media beam propagation. In this paper, the linear relationship between the propagation distance and the transportation mean free path was discussed. The demonstration of simulation and experimental results for generation of the non-diffracting beam by propagating different diameter annular beams was mentioned. The generation condition of the non-diffracting beam at arbitrary propagation distance and media concentration was estimated.

**Key Words:** Annular beam, Scattering media, Non-diffracting beam, Scattering waveform.

### 1. はじめに

乱層雲および濃霧といった高濃度散乱媒質において、光の伝搬範囲は制限される。光の出力を高めるほかに、光の送受信方法を工夫することで伝搬範囲を伸ばすことはレーザセンシングの応用拡大につながる。先行研究により、非回折光に自己変換できる環状光はライダーシステムの送信光として大気揺らぎの影響を抑え、長距離伝搬できることが解明された<sup>1)</sup>。この結果をヒントに、本研究では散乱が強い散乱媒質中における環状光の伝搬特性に着目した。異なる濃度、伝搬距離をもつランダム媒質中に環状光を入射し、非回折効果をもつ中心光強度を生成できた。伝搬距離に対する最大中心光強度を得る媒質濃度、ならびに輸送平均自由行程との関係に線形性を得た。これによって、異なるパラメータをもつ環状光から非回折光を生成し、それぞれ計算と実験上で統一性を検証した。さらに、任意の伝搬距離における非回折光の生成条件を推定した。

### 2. 実験・輸送平均自由行程

本研究では波長 532 nm の DPSS 固体パルスレーザーを使用した。ND フィルターを用いて送信ビームの強度を調整した。アキシコンプリズム対を向かい合わせることで送信光をガウス光から環状光への変換を行った。アキシコンプリズム間の距離を調整することで、生成する環状光の直径を変化できた。乳脂肪分が 1.8% (1.1  $\mu\text{m}\phi$ ) の加工乳を希釈した溶液 (0 ~ 23%) は W20×H20×L(1~30) cm の水槽に入れて

散乱媒質モデルとして利用した。焦点距離 4.5 mm のコリメートレンズとマルチモード光ファイバーとの組み合わせより、受光器の視野は 5.5 mrad とした。散乱媒質中に生成された散乱光の準直進光を選択的に受光し、散乱されたビームの強度分布を記録した。高い濃度の散乱媒質では、散乱光が微弱であるため、受光部には高感度の PMT を用いた。

単一の小さな粒子の散乱特性はレイリー散乱やミー散乱の理論で描写できる。しかし、実際の散乱は 1 回限りの散乱ではなく複数回散乱される。多重散乱を描写する際に重要な概念として式(1)に示す輸送平均自由行程が考えられる。

$$L^* = \frac{1}{n\pi d^2(1-g)Q}$$

本研究では、散乱体に加工乳を用いており単位体積あたりに含まれる粒子数  $n$  は、媒質中の牛乳濃度を  $R_m$ 、加工乳中の乳脂肪分の割合を  $R_f$ 、加工乳の比重を  $D_m$ 、乳脂肪球の比重を  $D_f$ 、乳脂肪球の半径を  $r_f$  として式(2)と表せる。

$$n = \frac{D_m R_m R_f}{\frac{4}{3}\pi r_f^3 D_f}$$

牛乳濃度  $R_m$  を変数 (100% を 1 とする) として、具体的な数値を代入し粒子数  $n$  を求めると  $n=3.321 \times 10^{16} R_m$  になる。散乱断面積  $Q$  はミー散乱理論を用いて算出され、算出した散乱断面積  $Q$  は 0.605887 である。異方散乱パラメータ  $g$  は 0.936 であり、式(1)に代入すると、輸送平均自由行程は  $4.292/R_m \times 10^{-4}$  になる。

### 3. 結果と考察

先行研究において<sup>2)</sup>、40 mm の直径をもつ環状光から生成された非回折光の条件より、輸送平均自由行程が得られる。Fig.1 に異なる伝搬距離における最大非回折光強度を得る媒質濃度から計算された輸送平均自由行程の変化を示す。3 ~ 30 cm の伝搬距離(黒点)では、輸送平均自由行程が線形に分布している様子が見え、この線型性から任意の伝搬距離における非回折光の生成条件が推定できる。しかし、先行研究の結果として、1 cm の散乱媒質距離では非回折光が生成されない。原因として、輸送平均自由行程(緑点)が負となり、生成条件に相当する濃度範囲が推定できないためである。本研究では、1 cm 伝搬距離を持つ散乱媒質内で非回折光の生成を実現するため、先行研究に用いた環状光のパラメータを変えることで、異なる直径を持つ環状光の空气中伝搬シミュレーションを行った。結果として、直径が小さいほど短距離で非回折光が生成させることを確かめた。この結果に基づいて、直径 10 mm の環状光を散乱媒質に伝搬させ、非回折光が生成された。Fig.2 は伝搬距離 5 ~ 30 cm の散乱媒質に環状光を伝搬させることで得られた散乱波形となる。散乱波形の中心部に幅 2 mm のピークが現れ、これはミー散乱の前方方向から生じた非回折光となる。生じた非回折光に相当する濃度から輸送平均自由行程の計算ができ、伝播距離との関係を Fig.3 に示す。結果から、この関係が線型性であることを確認した。さらに、線型性から 1 ~ 3 cm の伝搬距離における、非回折光の生成条件が推定された。推定条件を検証するため、1, 3 cm の散乱媒質における環状光(直径 10 mm)の伝搬実験を行った。結果として、散乱波形(Fig.2 の赤線)に導き出した高濃度範囲で非回折光が生成され、推定された輸送平均自由行程の値と一致された。以上のことから、この線型性および異なる環状光の伝搬特性に散乱媒質中における非回折光生成範囲を推定することが実現できた。

### 4. まとめ

先行研究の結果により、40 mm の直径をもつ環状光が 3 - 30 cm の散乱媒質に伝搬する際、最大中心光強度を現れる濃度から輸送平均自由行程が計算でき、伝搬距離との線型性を得た。1 cm の伝搬距離では輸送平均自由行程が負となり、非回折光が生成されないという結論を得た。次に、環状光の直径を 10 mm に変えることで、異なる濃度域の散乱媒質で非回折光が生成された。さらに、異なる直径による環状光伝搬のシミュレーションを行い、実験で生じた中心光強度の幅変化と同じ結果を得た。理論から実験を検証した。最後に、直径が 10 mm の環状光を用いた場合、輸送平均自由行程と伝搬距離の線型性から、任意の伝搬距離における非回折光の生成が実験上で実現された。

散乱媒質内に非回折光を生成する環状光を、環境

リモートセンシングに応用することは、散乱が強い対象内での情報を長深度測定できる光波センシング技術として期待できる。一方、雲中の散乱体としたエアロゾルと海洋中での生物由来の懸濁物などの定量計測において、物質量の推定、定量評価に本研究の環状光を利用する光伝搬手法ならびにそのセンシング応用が期待できる。

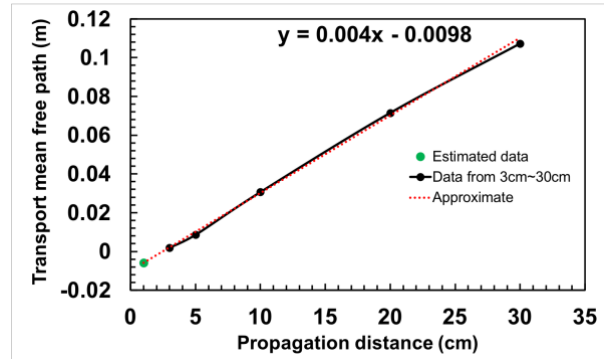


Fig.1 The variation between transport mean free path and propagation distance obtained by 40 mm annular beam.

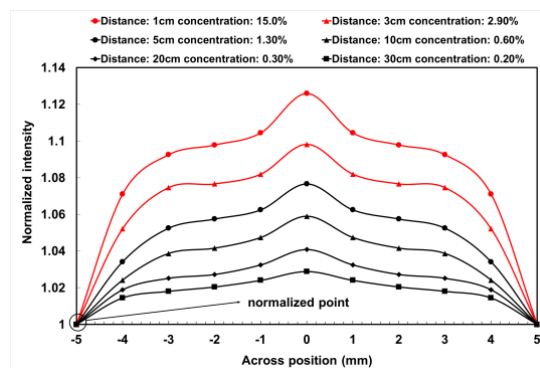


Fig.2 Scattering waveforms of annular beam (diameter 40 mm) propagated in scattering media by 1~30 cm distance.

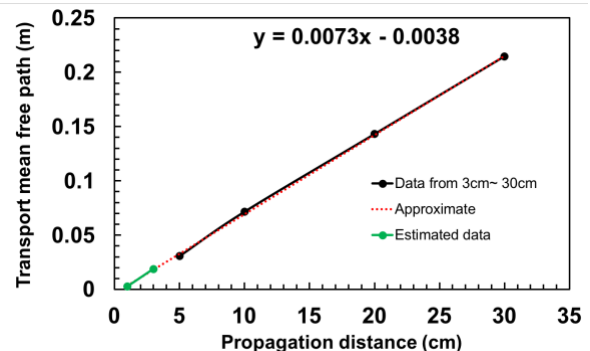


Fig.3 The variation between transport mean free path and propagation distance obtained by 10 mm annular beam.

### 参考文献

- 1) T. Shiina, et al., Opt. Commun. 279(1), 159-67 (2007).
- 2) X.Alifu, et al., 35th Laser Sensing symposium, E-1, (2017).