

# 高濃度散乱媒質中における非回折光伝搬特性の解析

シャフケティ アリフ, 彭 梓齊, 椎名 達雄

千葉大学大学院融合科学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

## Analysis of Non-Diffracting Beam Propagation Characteristics in High Concentration Random Media

XIAFUKAITI ALIFU, Ziqi Peng, and Tatsuo Shina

Chiba University 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8522 JAPAN

### Abstract:

Non-diffracting beam is widely used in optical sensing for its high propagation efficiency and high resolution. Due to the strong scattering, the light cannot penetrate or propagate long distance in random media such as cloud or human tissues. To propagate through long distance in random media, we propose a new method to generate a non-diffracting beam by annular beam through random media. The experiment was conducted with diluted processed milk (fat: 1.8%, 1.1 $\mu\text{m}\phi$ ). A narrow view angle detector of 5.5mrad was used to detect the forward scattering waveform. We obtained the central peak of non-diffracting beam at the propagation distance of 3cm ~ 30cm in random media by adjusting the concentration of < 23%. At the 22% concentration in 3cm of propagation distance in random media, the generated non-diffracting beam had the highest intensity ratio of 1.9%. The variation of the intensity ratio by increasing the media concentration was discussed.

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

### 1. はじめに

光を散乱媒質中で長距離に伝搬させることは、リモートセンシングの分野だけではなく、生体への計測でも注目されている<sup>1)</sup>。しかし、X線と異なる可視光は雲や生体などといった散乱媒質において強く散乱され、長距離伝搬させることは困難である。本研究では光の送受信方法を工夫することで、従来可視光による計測が困難な散乱媒質を長距離伝搬させることを目指している。

近年、長距離や高分解能が期待できるメリットを持つ非回折光は環境計測、医療計測や軍事産業などの光計測分野で測定対象の情報を非侵襲、非接触に測定する方法として応用されている。理由として、ベッセルビームのような非回折光は空気中で伝搬に伴い、回折をせず細いビーム径で中心強度を保って長距離伝搬できることが挙げられる<sup>2-4)</sup>。先行研究では、環状光を低濃度散乱媒質 (10~30cm) 内に伝搬させ、環状光が散乱の影響を受けながらも十分に可干渉性を保ちながら伝搬し、非回折光へ変化することを確認した<sup>5)</sup>。本研究では、研究室内で雲をモデル化した高濃度の散乱媒質中に非回折光を生成させることに成功し、散乱波形の変化の過程を解析した。本報告では、高濃度散乱媒質における環状光から生成された非回折光の伝搬特性について、散乱波形の解析を述べる。

### 2. 実験システム

#### 2.1 環状光の生成

本研究ではアキシコンプリズム対を使うことで送信光をガウス光から環状光へ変換する。ガウス光の振幅分布は式(1)で与えられる。

$$g(r) = 1/\pi h^2 \exp[-(r/h)^2] \quad (1)$$

$h$  は光強度が中心のピーク値の  $1/e^2$  となる位置で

の距離である。 $r$  は光の伝搬方向に垂直な面内での各点を表す。環状光の外径は  $R$  となる時、変換された環状光は式(2)で表される。

$$a(r) = \sqrt{(R-r)/r} \cdot g(R-r) \quad (2)$$

本研究では、送信光には外径 42mm、環厚 3mm の環状光を用いた。Figure 1 に散乱媒質における環状光伝搬の実験システムを示す。

#### 2.2 散乱媒質モデル

本研究では、散乱媒質として、乳脂肪分の濃度が年間を通して安定している加工乳を純水で希釈した溶液を用いた。主な散乱体は、平均粒子直径 1.1 $\mu\text{m}$  の乳脂肪球となるため、生じる散乱はミー散乱となる。

#### 2.3 計測方法

実験では尖頭出力 4.6kW で波長 532nm の DPSS 固体パルスレーザーを用いた。受光光学系開口径 6mm のコリメートレンズ、コア径 50 $\mu\text{m}$  のマルチモード光ファイバーと光電子増倍管 (PMT) の組み合わせで、視野角は 5.5mrad とした。計測方法として、環状光を濃度調整された散乱媒質中に伝搬させ、受光器を伝搬方向と垂直な方向にスキャンすることで、媒質からの散乱光のうち準直進光を選択的に受光して強度分布を記録する。

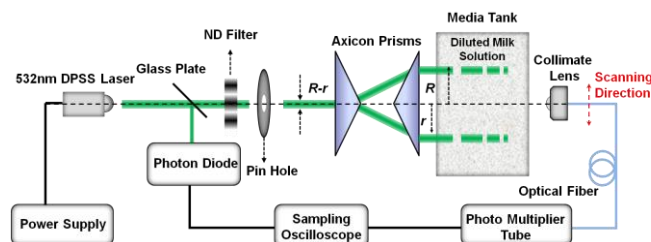


Figure 1 Experimental setup of annular beam propagation in random media.

### 3. 計測結果

Figure 2 に 5.0% 加工乳希釈液の中に環状光を 5cm 伝搬した後、受光した波形を示す。20mm の位置で強度を正規化した。波形で中心部(光軸上)は周辺部よりも大きいピーク(6mm の幅)があり、これは前方散乱光から生成された非回折光である。波形全体の緩やかなカーブは多重散乱による等方散乱光であり、非回折光と等方散乱光の最大中心強度の比である強度比が計算できる。強度比から非回折光の強さが評価でき、一番強い非回折光の強度比は 1.85% となった。Figure 3 に 16%~22% (下から上への順番) 濃度範囲での牛乳希釈液を用いて、環状光を 3cm 伝搬した後、受光した波形を示す。濃度が 16% の波形から中心に小さいピークが現れ、濃度の増加に伴い、強度比が大きくなっていく。最大強度比は 22% 濃度に現れ、その強度比は 1.9% となった。伝搬距離が短いほど高濃度でより強い前方散乱光を生じ、非回折光の強度も大きくなる。濃度が 22% 以上になると前方散乱光が強く減衰し、強度比が下がっていく。

### 4. 考察

Figure 4 に伝搬距離 30cm, 20cm, 10cm, 5cm, 3cm の場合、媒質濃度の増加に伴う、中心強度比の変化を示す。例として、30cm 伝搬の場合には 0.4% の媒質濃度で非回折光の最大強度比が現れたが、3cm 伝搬の場合に最大ピークが 22% の高濃度で生じ、強度比が 2 倍高くなった。これは、環状光が短距離の散乱媒質中に伝搬する際、高濃度でより強い前方散乱を生じることによる。30cm 伝搬の場合では、媒質濃度が 0.2%~0.5% の範囲で非回折光が生じた。一方、環状光が 3cm の散乱媒質中に伝搬する際、伝搬距離 30cm の場合より広い濃度範囲(16%~22%)で非回折光が生じた。環状光はそれぞれ 3cm ~ 30cm の伝搬距離で散乱媒質中に伝搬する際、伝搬距離が短く、高濃度になるほどより広い範囲の濃度で非回折光を生成し、強度比の大きい非回折光を生成できるという結果が得られた。これは、輸送平均自由行程が短くなり、その適用範囲が広がるためと考えている。

### 5. まとめ

環状光を 3cm の短距離散乱媒質に伝搬させ、16% ~ 22% の媒質濃度範囲で非回折光を生成させることに成功した。3cm ~ 30cm 伝搬実験の結果を用いて、濃度と中心強度比との変化を比較した。伝搬距離が短くなるほど高濃度による、より広い範囲の濃度で非回折光を生成し、強度比の大きい非回折光を生成することができる。この結果は、今後の更なる短距離伝搬実験の指針になる。散乱媒質内に非回折光を生成する環状光を、環境や医療計測といった様々な分野に応用することは、対象の情報を非侵襲に高効率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、大気中の散乱体としてはエアロゾルの定量計測と海洋中では生物由来などの懸濁物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。

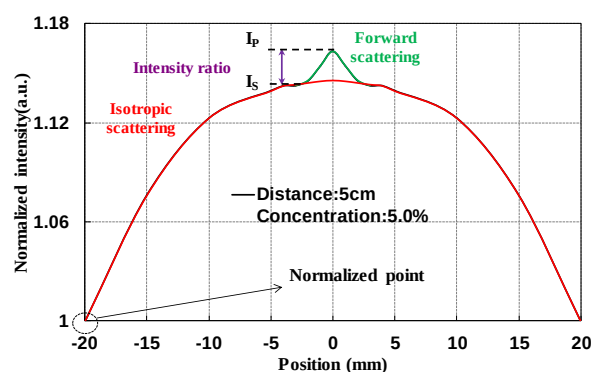


Figure 2 The scattering waveform of annular beam propagated in random media by 5cm propagation.

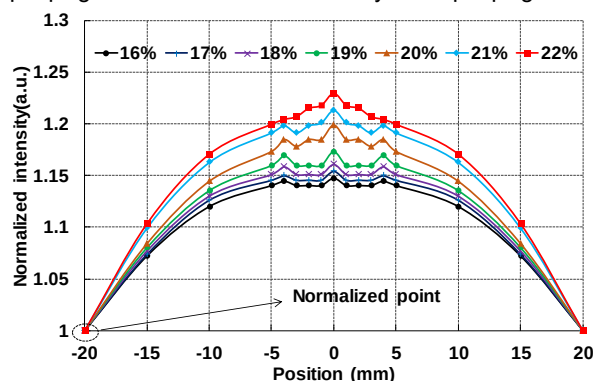


Figure 3 Scattering waveforms of annular beam at concentration range of 16% ~ 22% in random media by 3cm propagation.

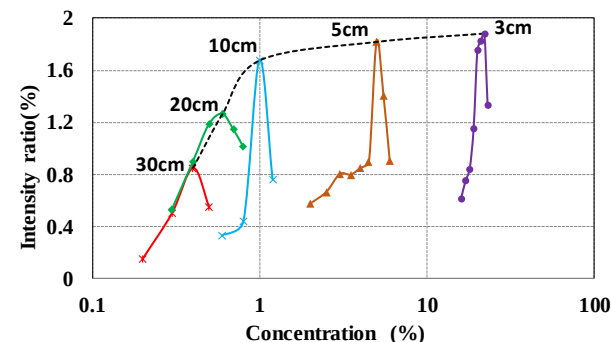


Figure 4 Analysis of intensity ratios with respect to the increases of concentration given different propagation distances.

### 参考文献

- 1) V. V. Tuchin, ed., "Selected Papers on Tissue Optics: Applications in Medical Diagnostics and Therapy", SPIE Milestone Series 102, 1994.
- 2) J. Durnin, and J. J. Miceli, Jr., and H. J. Everly, "Exact solutions of nondiffracting beams. I. The scalar theory", J. Opt. Soc. Am., A4, pp. 651-654, 1987.
- 3) T. Aruga, "Generation of long range nondiffracting narrow light beams", Appl. Opt., 36, 3762-3768, 1997.
- 4) T.shiina, M. Ito, and Y. Okamura, "Nearly Non-Diffractive Beam for Lidar Application", Proceeding of SPIE Laser System Technology, V.5087, p.115-123, 2003.
- 5) Ziqi Peng and Tastuo Shiina, "Generation control of a non-diffractive beam in random media by adjusting concentration", Opt. Commun., V.391, pp.94-99, 2017.