

# LHM と RHM が 50% で ランダムに分布した媒体を抜ける平行波の放射

Parallel wavefront radiation through 50% composition of random distributed LHM and RHM material

朝倉 道 (岩手大院), 大坊 真洋 (岩手大)

Sho Asakura, Masahiro Daibo

〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5 岩手大学工学部電気電子・情報システム工学科大坊研究室大坊真洋,  
Tel: (019)621-6983, E-mail: daibo@iwate-u.ac.jp

## 1. 序論

左手系媒体 (Left-Handed Material:LHM) とは, 誘電率と透磁率が共に負値であり負の屈折率を持った媒体である. LHM は, 右手系媒体 (Right-Handed Material:RHM) とは異なった特性を有し, 従来の技術では不可能である不可視物質などの開発への応用が期待されている. しかし光領域の LHM の作製にはナノテクノロジーが必要であり, 入手及び実験に困難が伴う. そのためシミュレーションによる実験で特性を観察することが重要である.

本論文では, FDTD 法を用いて LHM と RHM を混合比 50% で構成した媒体の光伝播をシミュレーション結果を報告する.

## 2. LHM

光学領域の波長で誘電率と透磁率が同時に負値を取る媒体は自然界には存在しない. しかし特定の周波数帯の電磁場に対し負の誘電率を持つ金属が存在し, また微小コイルを規則的に配置することで負の透磁率を実現できる. この特性を組み合わせ, 負の誘電率の金属で微小コイルの構造を作ることによって LHM は人工的に作製できることが実験的に証明されている [1].

LHM 内ではスネルの法則が反転し, 波の位相速度が RHM と逆になり (図 1), 屈折率が-1 の LHM を伝搬する電磁場の群速度は屈折率が 1 の RHM の約 1/3 になる.

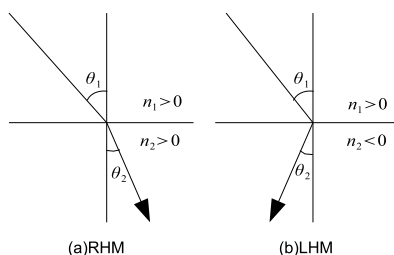


図 1 LHM における電磁場の屈折

実験で扱う LHM の屈折率は-1 であり, マッチング条件を満たすため媒体境界面で反射が起こらず, LHM を伝搬する電磁場は RHM を伝搬してきた電磁場の鏡像になる.

## 3. ランダム配置した LHM

シミュレーションは FDTD 法を採用し 2 次元で行った. 自由空間と LHM の立方体型のセルがランダムに配置した媒体を扱い, 我々はこれをランダム媒体と呼んでいる. 媒体の LHM 密度が 50% の場合, 電磁場が入射するとランダム媒体中で波面がランダムに散乱されるが出射面に平行な波面を出力する性質があることを, 我々はシミュレーションで確認している [2].

また LHM の密度が 50% から外れると出射面に平行な波面を出力する性質を示しにくくなり, 存在比の大きい方の媒体の性質を示す.

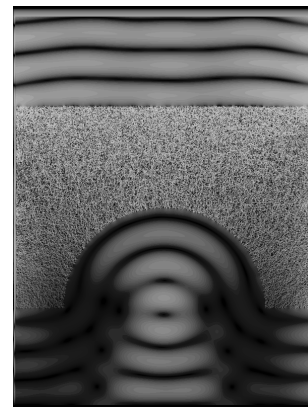


図 2 平行化を利用した集光

## 4. シミュレーション

長方形ランダム媒体の下部を円形に切り取ることで円の中心に電磁場が収束するレンズ作用が実現できた. この集光作用を持った 50% ランダム媒体の途中を分割した媒体に点光源による電磁場を入射するシミュレーションを行った. 分割前の媒体と分割後の媒体のランダム媒体の総面積

は同じであり、空隙部を除くと元の形状になる。この媒体の空隙部を伝搬する電磁場と出射光を観察し、分割前の媒体と比較した。

また集光作用を示すのに十分な厚さの 50% ランダム媒体の長方形部に様々な形状の空隙を作り、線光源の電磁場を入射させて出射波面を調べた。先の実験とは異なり元の媒体と比較して実験に用いた媒体の総体積は空隙の体積分小さくなっている。

これらの実験を計算の複雑化を避けるため、FDTD 法の計算を 2 次元に制限して TM 波をシミュレーションした。

さらに表 1 に示した条件でシミュレーションを行い計算領域中の電界強度 ( $E_x^2 + E_y^2$ ) から画像化した。

表 1 シミュレーション条件

LHM の比誘電率	-1.0
LHM の比透磁率	-1.0
セルサイズ	5 nm
PML 層	8 cell
タイムステップ	$5.0 \times 10^{-18}$ s

## 5. 結果

実験で用いられるランダム媒体は 1 辺の大きさが 1 cell の立方体 LHM を RHM 空間にランダムに配置した。

集光作用を持つランダム媒体の長方形部を図 3, 4, 5 のように分割し、空隙部及び出射面での電磁場を確認した。

まず空隙部を長方形にして分割した場合 (図 3)、電磁場は長方形部分の出射面から平行な平面波で出力され、次に下部を透過し出射面では円の中心に集光した。上部長方形媒体によって球面波が一旦平面波に変換され、線光源からの出力に近い波面になる。線光源からの平行化が良好になるのはこれまでのシミュレーションで確認しており、同様の状態で入射した電磁場は下部円形切断部での集光が容易になったと考えられる。

次に空隙部を V 字にして分割した場合 (図 4)、電磁場は V 字空隙部の谷の部分に集光しながら下部へ入射する。長方形空隙の場合と比較して電界強度は中央付近で強くなっているが下部円形切断部での出射の強度は先の実験及び元の媒体の場合と同様になった。

空隙部を平行四辺形にして左右非対称に分割した場合 (図 5)、上部台形の出射面に平行の波面が空隙を伝わり、空隙から平面波が集光部へ垂直に入射して下部円形切断部の中心へ集光した。左右対称でない媒体であっても元の媒体と同様の電磁場伝搬が確認された。

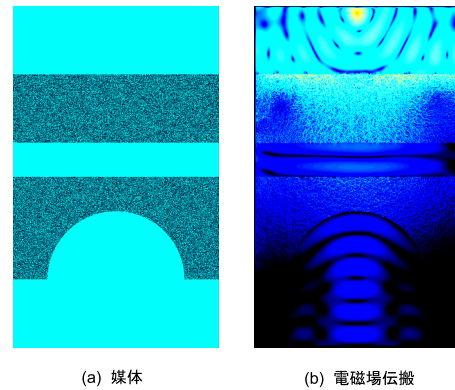


図 3 長方形空隙による分割

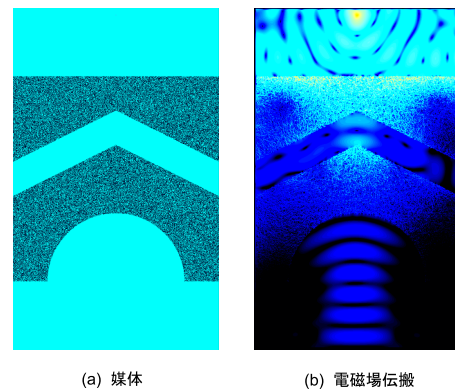


図 4 V 字空隙による分割

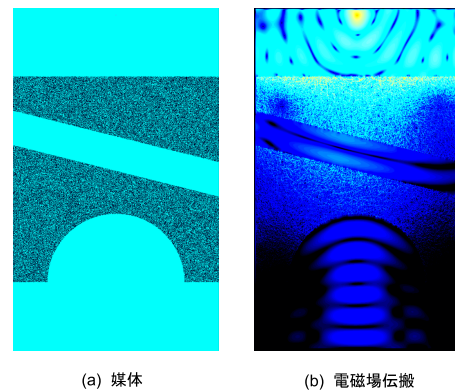
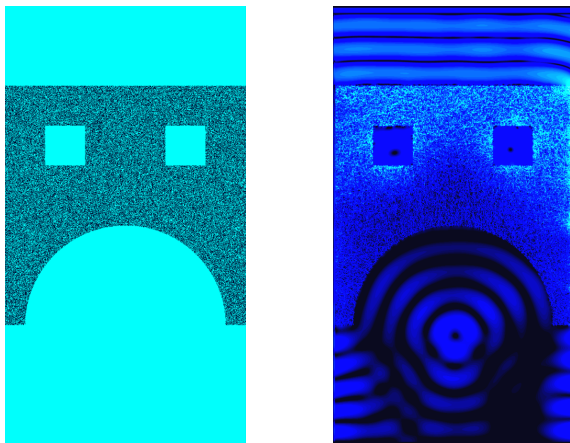


図 5 平行四辺形空隙による分割

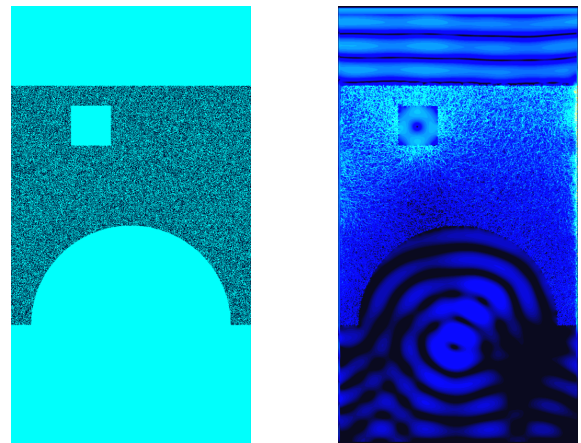
次に長方形部に正方形のポイドを x 軸に左右対称に平行に並べて電磁場の伝搬を確認した。

ポイドを正方形にして x 軸に平行に並べた場合 (図 6)、円形空隙の場合と比較して波が歪んだが、定常状態に近づくと歪みは軽減され円形波面に近い形で出力された。最後まである程度の歪みを残したままになったが空隙があったとしても集光することが確認できた。



(a) 媒体 (b) 電磁場伝搬

図6 x軸に平行に正方形空隙を作った媒体

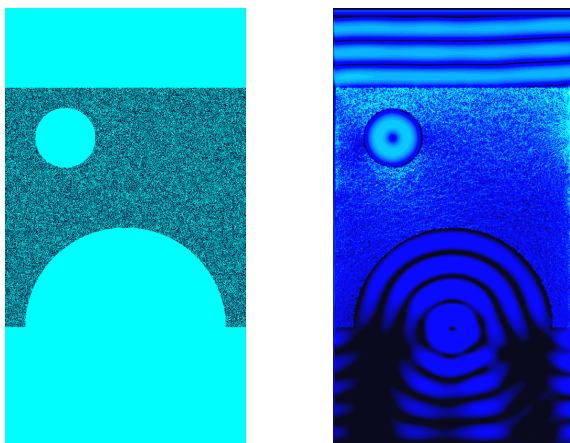


(a) 媒体 (b) 電磁場伝搬

図8 正方形空隙によって非対称にした媒体

媒体の対称性を崩すために、長方形部の左側にポイドを作り電磁場を透過させるシミュレーションを行った。

長方形部の左側に円形の空隙を作った場合(図7),ポイドでもランダム媒体の性質を示し円の中心に集光する.透過光は集光位置に対して非対称であるにも拘らず位相が揃って下部の円の中心に集光した.ポイドを透過し再びランダム媒体に戻る波面はポイドを透過していない周囲の波面と位相が合っている.そのため第一波が下部円に到達する時間は異なり透過の初期段階では強度に差が出るが,定常状態になると安定して集光した.



(a) 媒体 (b) 電磁場伝搬

図7 円形空隙によって非対称にした媒体

次に長方形部の左側に正方形のポイドを設けた場合(図8),ポイドの真下に位置する円の一部分の出力が弱くなり,波形が歪んだ.ポイドとランダム媒体の境界に電界強度が強くなる部分が現れ,その下方向に進む電磁場はポイドのない部分を伝搬する電磁場より弱くなりゆがんでいると考えられるが,先の実験と同様に時間が経過すると減衰が軽減され円形になる.

## 6. 結論

LHM と RHM の混合比が 50% でランダムに分散させた媒体中の電磁場伝搬を FDTD 法でシミュレーションした.途中で分割した媒体は,分割前と同様の波面を出力をすることが確認できた.空隙部を伝搬する電磁場が空隙の形状によって異なるにも関わらず同等の出力をすることから,ランダム媒体の出力は伝搬の経過に関わらず出射面のみ依存すると考えられる.

また平行化性質を示すのに十分な厚さのランダム媒体にポイドを作った場合にも集光は見られた.ポイドが円形の場合は良好な平行化が確認できたが正方形の場合は出力波面の平行化が完全ではなく,ポイドの形状が出射波面の平行化に影響を与えることが分かった.波形が歪んだ場合には時間が経過することで減衰が軽減され,中心に集光していく.

## 参考文献

- [1] D. Karkashadze, J. P. Fernandez, F. Shudbtidze “Scatterer localization using a left-handed medium”, OPTICS EXPRESS, Vol.17, No.12, 9904 (2009)
- [2] 朝倉道, 大坊真洋 “負の屈折率媒体による電磁場制御”, 2010 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2B14