

# 次世代テラヘルツ無線通信のための 屈折率オンデマンド制御によるメタマテリアルアンテナの研究

代表研究者 鈴木健仁 茨城大学 工学部 講師

## 1 まえがき

近年、テラヘルツ波の光源は非常に充実してきている。例えば、2013年に量子カスケードレーザーにより160Kで1.89 THzのテラヘルツ波発振が報告されている[1]。2016年に共鳴トンネルダイオードにより室温での基本波発振周波数として1.92 THzが報告される[2]。2017年には差周波発生量子カスケードレーザーにより、室温で2.8 THzのテラヘルツ波発振が報告[3]されるなど、テラヘルツ波の光源が充実してきている。

しかしながら、テラヘルツ波を制御する技術はまだ成熟していない。使いやすい材料が少ないテラヘルツ波帯において、自然界由来の材料にはない特性を持った材料探索は重要な課題である。これまで、非対称なカット金属ワイヤーのメタアトムにより動作周波数0.42 THzで $n_{\text{eff}} = -4.2 + j0.17$ [4, 5]、I型のメタアトムにより動作周波数0.47 THzで $n_{\text{eff}} = -2.0 + j1.3$ [6]などにより負の屈折率の実現が報告されているが高周波数化は1つの解決すべき課題である。

メタマテリアルは微小な構造体を用いて、比誘電率と比透磁率を制御することで自然界には存在しない負の屈折率を実現できる。本研究では新たな拡張構造を用いて2.0 THz帯で、負の屈折率 $n_{\text{eff}} = -3.0 + j0.29$ 透過電力56%、反射電力3.5%を実現した。具体的には誘電体フィルムの表裏にメタアトムとなるカット金属ワイヤーを非対称に配置し、比誘電率 $\epsilon_r$ 、比透磁率 $\mu_r$ を同一周波数で負の値に制御することで、負の屈折率を実現した。誘電体フィルムには、テラヘルツ波帯で誘電体損失の少ないシクロオレフィンポリマーフィルムを用いた。シクロオレフィンポリマーフィルムの両面に銅を成膜し、エッチング加工により作製した。作製した負の屈折率を有するメタマテリアルを、テラヘルツ時間領域分光法を用いて評価した。作製した負の屈折率材料をレンズなどの光学素子に応用することで設計に自由度が増し、テラヘルツ波を制御する光学素子の充実に貢献できる。

## 2 負の屈折率の動作原理

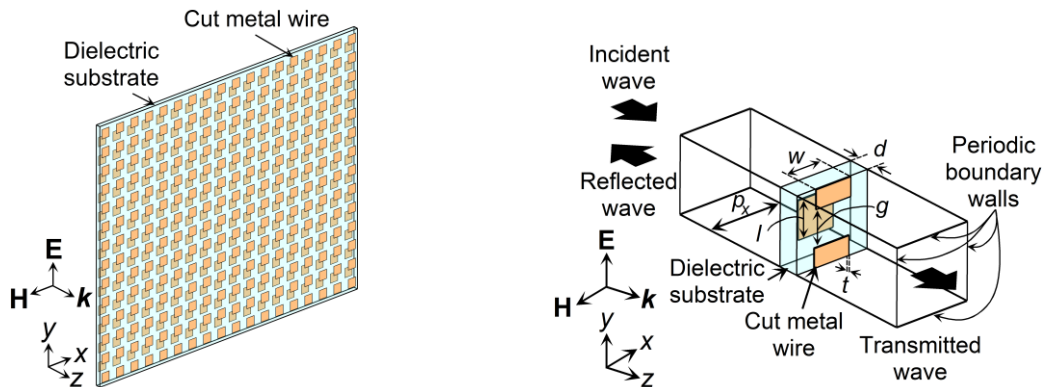


図 1(a) 負の屈折率 2次元メタマテリアル

(b) 解析モデル

図 1(a)に非対称ペアカット金属ワイヤーによる負の屈折率 2次元メタマテリアルを示す。y 軸方向に対して表と裏でずらした非対称構造である。図 1(b)に非対称ペアカット金属ワイヤー構造の解析モデルを示す。解析モデルの外部に周期境界壁を設けることで、全体構造から1周期分を抜き出している。負の屈折率構造は、表裏のカット金属ワイヤーの長さ $l$ とy軸方向のカット金属ワイヤーの間隔 $g$ により誘電性と磁性の共振を制御し、比誘電率と比透磁率が同じ周波数帯で負にすることで実現できる。誘電性と磁性の共振は図2のように等価回路を用いて説明できる。誘電性の共振は、金属ワイヤー自体が持

つインダクタ成分と金属ワイヤー間のギャップ部によるキャパシタ成分により決定する。磁性の共振は表裏の金属ワイヤー自体が持つインダクタ成分と表裏の金属ワイヤー同士のキャパシタ成分により決定する。誘電性と磁性の共振を設計周波数で同時に起こすことで、負の屈折率を実現できる。

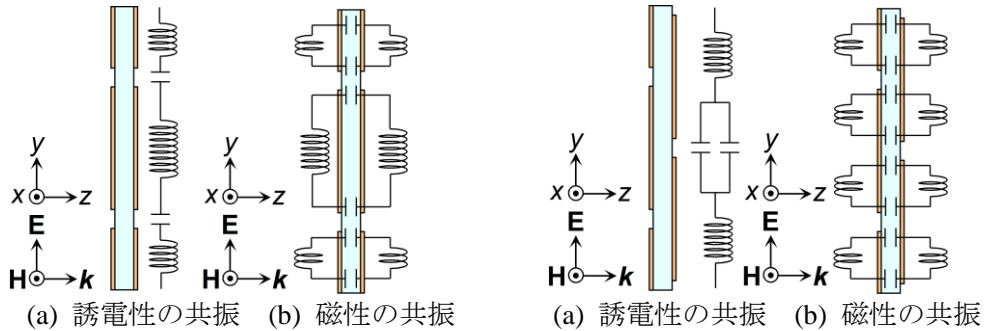


図 2 等価回路

### 3 負の屈折率の設計

カット金属ワイヤーを用いた屈折率の設計はカット金属ワイヤーの長さ  $l$  とカット金属ワイヤー間のギャップ  $g$  を変化させ、誘電性と磁性の共振を制御することで任意の値に設計できる。カット金属ワイヤーの長さ  $l$  とカット金属ワイヤー間のギャップ  $g$  を変化させ比誘電率と比透磁率が共に設計周波数で負の値となるよう制御することで、負の屈折率を実現できる[7, 8]。図 1(b)に解析モデルを示す。金属には導体損の少ない銅  $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$  を使い、誘電体基板にはシクロオレフィンポリマー  $n_{\text{COP}} = 1.53 + j0.0012 (0.5 \text{ THz})$  を用いた。設計には有限要素法電磁界シミュレータ ANSYS 社 HFSS Ver.14.0.1 を用いた。設計モデルの周期構造解析により得られる散乱行列から、次式により実効屈折率  $n_{\text{eff}}$  を導出した[9]。

$$n_{\text{eff}} = \frac{\text{Im}[\ln(e^{jnk_0(d+2t)})] + 2m\pi - j \text{Re}[\ln e^{jnk_0(d+2t)}]}{k_0(d+2t)} \quad (1)$$

$$e^{jnk_0(d+2t)} = \frac{S_{21}}{1 - S_{11} \frac{Z_r - 1}{Z_r + 1}} \quad (2)$$

$$Z_r = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (3)$$

ここで  $k_0$  は自由空間の波数、 $m$  は整数、 $Z_r$  は比インピーダンスである。

2.0 THz 帯での設計では表 1 のパラメータにより、 $n_{\text{eff}} = -2.5 + j0.039$ 、透過電力 78%、反射電力 16% を設計した。図 3 に 2.0 THz 帯でのカット金属ワイヤーの長さ  $l$  を 10~100  $\mu\text{m}$ 、カット金属ワイヤー間のギャップ  $g$  を 10~100  $\mu\text{m}$  で変化させた等高線図を示す。表 1 のパラメータは等高線図の X マークである。その他のパラメータは  $d = 23 \mu\text{m}$ 、 $w = 51 \mu\text{m}$ 、 $p = 100 \mu\text{m}$ 、 $t = 0.5 \mu\text{m}$  で固定している。

表 1 設計パラメータ

$d$	$l$	$g$	$w$	$p_x$
23 $\mu\text{m}$	55 $\mu\text{m}$	55 $\mu\text{m}$	51 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$

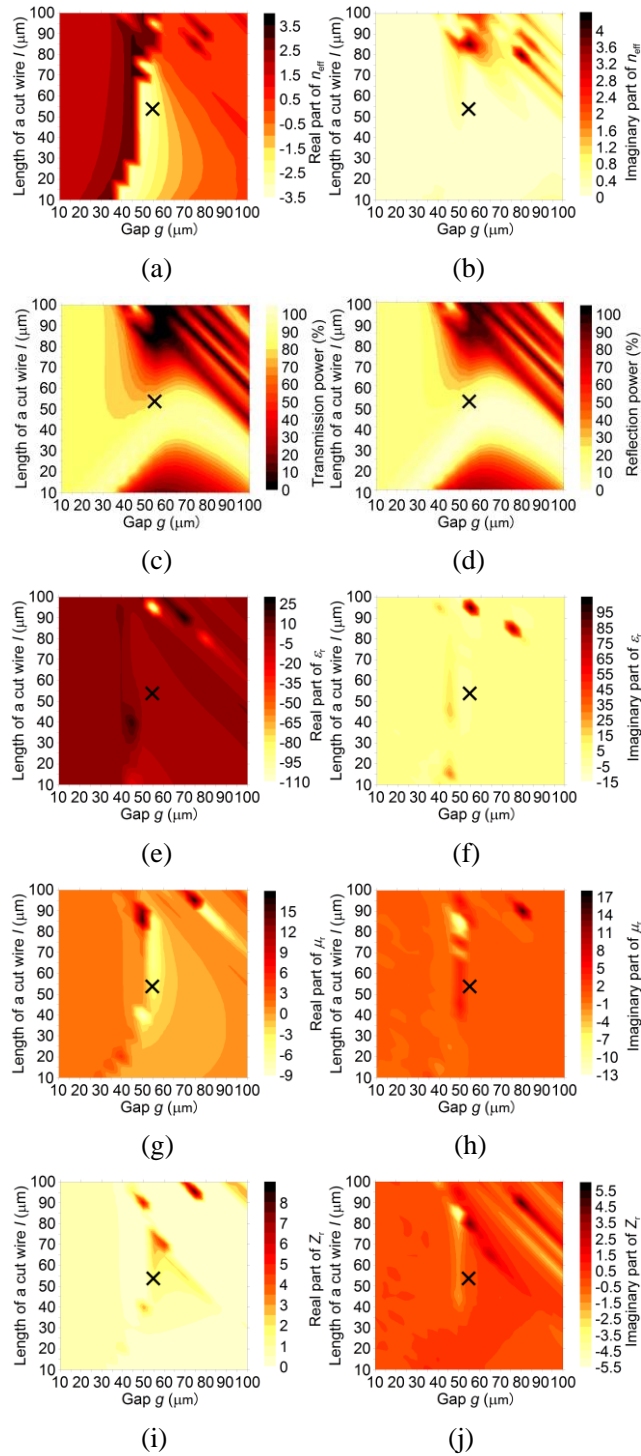


図3 等高線図

(a) 屈折率の実部 (b) 屈折率の虚部 (c) 透過電力 (d) 反射電力 (e) 比誘電率の実部 (f) 比誘電率の虚部 (g) 比透磁率の実部 (h) 比透磁率の虚部 (i) 自由空間の波動インピーダンスで規格化した波動インピーダンスの実部 (j) 自由空間の波動インピーダンスで規格化した波動インピーダンスの虚部

#### 4 非対称ペアカット金属ワイヤーの作製と実験評価

シクロオレフィンポリマーフィルムの両面に銅を成膜し、エッチング加工により作製した。図4に作製した素子、図5に2.0 THz 帯素子の実験と解析結果を示す。実験にはテラヘルツ時間領域分光法を用いた。2.0 THz 帯で、

$n_{\text{eff}} = -3.0 + j0.29$ 、透過電力 56%、反射電力 3.5% を実験により確認した。ペアカット金属ワイヤーの反射測定の光路長は、ミラーを用いたりファレンスの反射測定の光路長と比べて、素子フィルムの盛り上がりにより、 $31 \mu\text{m}$  短いと見積もり実験結果を補正している。図 5(f)、(g) に誘電性、磁性によるエネルギー損失のグラフを示す。それぞれのエネルギー損失は以下の式で表される[10]。

$$Q = \frac{\omega \epsilon_0 |E|^2}{2|\mu_r|} [|\mu_r| \text{Im}(\epsilon_r) + |\epsilon_r| \text{Im}(\mu_r)] \quad (4)$$

ここで、 $\omega$  は角周波数、 $\epsilon_0$  は真空中の誘電率、 $E$  は電界強度を示している。式(4)より、誘電性によるエネルギー損失  $|\mu_r| \text{Im}(\epsilon_r)$ 、磁性によるエネルギー損失  $|\epsilon_r| \text{Im}(\mu_r)$  の合計値が正であれば、媒質中でエネルギーは損失していると見なせる。図 5(f) より実験結果の誘電性によるエネルギー損失は 1.95 THz から 2.0 THz で負の値をとる。実験結果の磁性によるエネルギー損失は 1.75 THz から 1.94 THz で負の値をとるが、図 5(g) に示す  $|\mu_r| \text{Im}(\epsilon_r)$  と  $|\epsilon_r| \text{Im}(\mu_r)$  の合計値は常に正の値となり、エネルギーは損失している。図 5(h) に電力損失のグラフを示す。電力損失も常に正の値をとる。

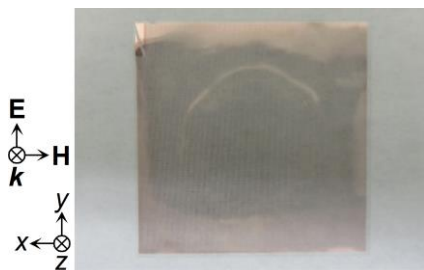


図 4(a) 試作した負の屈折率メタマテリアル

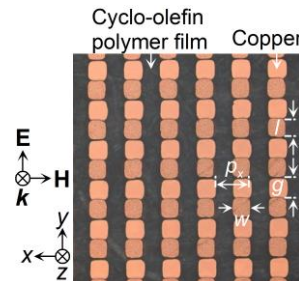
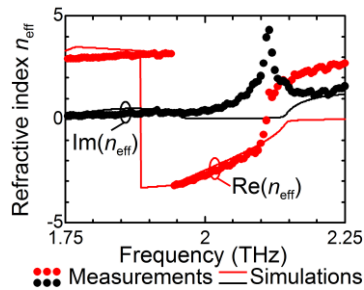
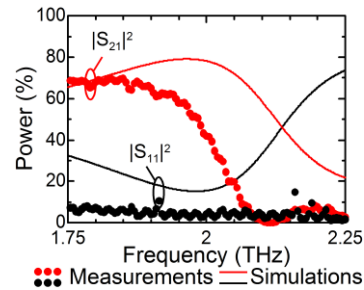


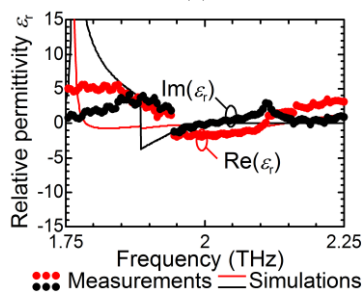
図 4(b) 拡大図



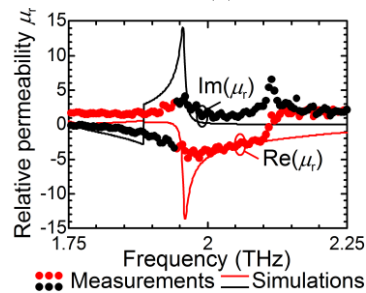
(a)



(b)



(c)



(d)

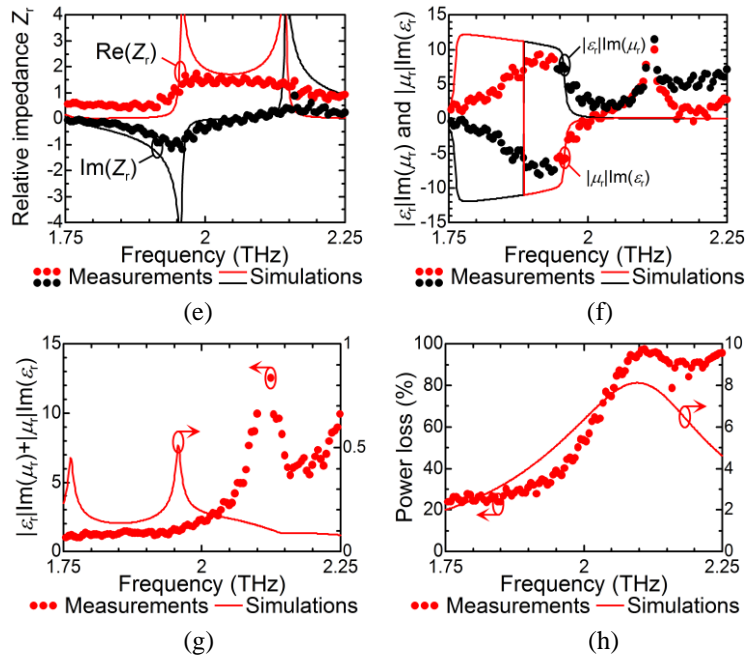


図5 実験結果

(a) 屈折率 (b) 透過電力・反射電力 (c) 比誘電率 (d) 比透磁率 (e) 自由空間の波動インピーダンスで規格化した波動インピーダンス (f) 誘電性と磁性のエネルギー損失 (g) 誘電性と磁性のエネルギー損失の和 (h) 電力損失

## 5 まとめ

本研究では完全非対称ペアカット金属ワイヤー構造を用いて2.0 THz帯で、負の屈折率 $n_{\text{eff}} = -3.0 + j0.29$ 、透過電力56%、反射電力3.5%を実現した。負の屈折率材料をレンズなどの光学素子に応用することで設計に自由度が増し、光学素子の充実に貢献できる。

### 謝辞

銅成膜シクロオレフィンポリマーフィルムを御提供いただいた住友金属鉱山株式会社の浅川吉幸様に深く感謝申し上げます。

### 【参考文献】

- [1] M. Sasaki, T.T. Lin, and H. Hirayama, Phys. Status Solidi C **10**, 1448 (2013).
- [2] T. Maekawa, H. Kanaya, S. Suzuki, and M. Asada, Appl. Phys. Express **9**, 024101 (2016).
- [3] K. Fujita, A. Ito, M. Hitaka, and T. Edamura, The 64th JSAP Spring Meeting, 2017, 14p-211-5 (2017).
- [4] Y. Takebayashi et al., IEICE Technical Group on Terahertz Application System, 11 (2015).
- [5] Y. Takebayashi et al., IEEJ Trans. Sens. Micromach. **135**, 476 (2015).
- [6] M. Awad et al., Opt. Lett. **33**, 2683 (2008).
- [7] H. Kubo et al., IEICE Trans. Electron. **E95-C**, 1658 (2012).
- [8] B. Kanté et al., Phys. Rev. B **79**, 075121 (2009).
- [9] X. Chen et al., Phys. Rev. E **70**, 016608 (2004).
- [10] Y. Minowa, et al., Opt. Express **16**, 4785 (2008).

### 〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
なし		