

テラヘルツテクノロジーフォーラム通信

Vol.12, No.1

巻頭言

テラヘルツテクノロジーフォーラム会長 萩行正憲

フォーラム会長 2 年目を迎えて

昨年度からテラヘルツテクノロジーフォーラムの会長の重責を引き受けてはや 1 年が経ち、2 年目に入りました。何もしないであつという間に 1 年が過ぎてしまったという思いですが、テラヘルツテクノロジー自身は、やや停滞していた時期 (?) を過ぎて、新たな展開が見え始めてきたように感じられます。毎年の IRMMW-THz 会議の国別参加者数を見ると、主催国以外では日本が最も多く、発表の内容も質が高いと感じます。このようなテラヘルツ分野における我が国の高いアクティビティは、吉永先生、三石先生、西澤先生などの先駆的な研究があつて、それらを引き継いでまとめる形でテラテクや学振の産学協力研究委員会がこの分野を牽引してきたからであろうと思います。昨年の IRMMW-THz では阪井前会長が Button 賞を受賞されて、記念講演では 1950 年代から現在までの我が国のテラヘルツテクノロジーの発展について紹介されました。また、最近、J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves 誌に、それ以前のテラヘルツテクノロジー（遠赤外と呼んだ方がしっくりする方もおられると思います）の発展に関する三石先生の論文（日本赤外線学会誌に掲載されたものを阪井先生が訳された労作）が掲載されました。会員の皆様には是非ご一読いただけたらと思います。2012 年に奈良で開催された International Symposium on Frontiers in Terahertz Technology (FTT 2012) の発表論文から選りすぐられた論文を集めた論文集が、J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves 誌の特集号として発行されました。これも合わせてお読みいただければと思います。

さて、最初に書いた新たな展開というのは、もちろん、テラヘルツ分野の研究自身の進展もさることながら、アドバンテスト社がテラヘルツを事業部門として立ち上げたこと、情報通信機構が総務省のバックアップを得て「テラヘルツ波コンソーシアム(仮)」を立ち上げるとのこと、テラテクが主体として提案した JST の産学共創基礎基盤研究プロジェクトが伊藤 PO の熱心な運営努力のもと、多くの成果を出しつつ、新たなプロジェクト募集を行っていることなど、があります。JST のプロジェクトには、私もアドバイザーとして参加させていただいていますが、何とか、10 年間のプロジェクト終了時には、「テラヘルツでイノベーションを」という皆さんの思いが感じられます。

私も大学人としてあと 4 年で定年を迎えます。10 年あまり前からコンパクトデジカメで日常の写真を撮ることを趣味としていますが、このデジカメもソニーの「マビカ」以来、現在の形になるまでは悪戦苦闘であったと思います。液晶もまたしかり。写真を整理していたら、2003 年 5 月 16 日（テラテク設立の少し前）の会議の写真が出てきました。阪井前会長は変わりませんが、私は髪が白くなり、相当劣化が激しいです。海のものとも山のものともわからない時代を信念と情熱で乗り越えてこられた先達に感謝の気持ちでいっぱいです。



研究紹介

テラヘルツ波高機能制御のためのメタマテリアルによる光学素子・アンテナの研究開発

茨城大学 工学部 電気電子工学科 鈴木 健仁

1. まえがき

茨城大学工学部電気電子工学科鈴木研究室(図 1)では、図 2 の通り従来の物理の枠を超えた屈折率領域を探索することを1つの目標に、テラヘルツメタマテリアルによる光学素子、アンテナの研究開発を進めている。そこで本稿では、マイクロ波、ミリ波帯を含めた様々な研究グループの先行研究の参考文献とともに、現在、当研究室で進めているメタマテリアルによる光学素子・アンテナの研究開発の最新動向について報告を行う。

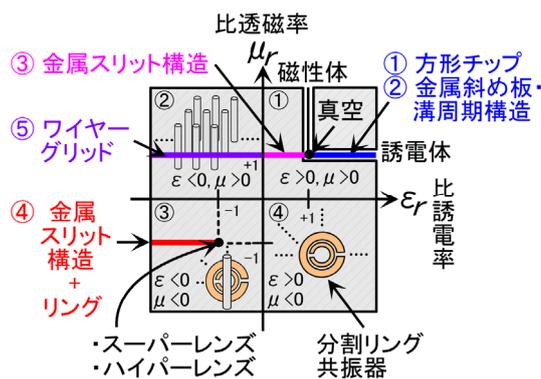
メタマテリアル分野の研究では、負の屈折率(2009年トムソン・ロイターノーベル賞有力候補者 Prof. D. R. Smith、Prof. Sir John B. Pendry)、回折限界を超えた解像度、キラリティの発現、高屈折率無反射現象など、日夜、世界中で激しい研究競争が起きている。原子より大きい電磁波の波長に対しては微小なサイズで、図 2 の金属ワイヤーや分割リング共振器[1]などの構造体を、原子や分子に見立てて配列し、自然界には存在しない電磁的性質(比誘電率、比透磁率)を持つスーパー物質(メタは“超”の意味)を設計できる概念である。メタマテリアルによる屈折率制御の動作は[2]で分かりやすく解説されている。

テラヘルツ分野の研究では、グラフェンでの光学量子ホール効果[3]が観測されるなど、近年、テラヘルツ波を活用した計測によりサイエンスの新しい扉が開かれ、テクノロジーが大きく進展する可能性に注目が集まっている[4]。さらに、X線に代わる安全、安心かつ高精度な可視化技術の1つとして、回折限界を突破した近接場によるテラヘルツナノイメージング[5]に関する魅力的な報告もされ、最近では1.4 THzで分解能400 nm($\lambda/540$)が実現されている[6]。また、共鳴トンネルダイオードによる超高速無線通信の研究なども積極的に推進されている[7, 8]。

そのような中、テラヘルツメタマテリアルにより高屈折率無反射構造、ゼロ近傍屈折率構造、負の屈折率構造など自然界の材料では実現できない屈折率領域を実現できる。これらの構造は高利得レンズアンテナ(図 3①②)、テラヘルツ波面制御(図 3③)、テラヘルツナノイメージング(図 3④)、超高感度偏光計測などとして応用でき、テラヘルツ計測素子の拡張構造の要求に応えられる魅力を秘める。



図 1 研究室メンバー



第 1 象限: 右手系材料

第 2 象限: ϵ ネガティブ材料

第 3 象限: 左手系材料

第 4 象限: μ ネガティブ材料

図 2 比誘電率と比透磁率の分類

2. テラヘルツメタマテリアル

① 金属方形チップ周期構造 ($n > 1$)

テラヘルツイメージャー[9]を用い、図3①の金属方形チップ構造によるテラヘルツ波の集光を確認した[10]。高周波数帯では、金属の厚みは表皮の厚さの2~3倍が望ましく、0.5 THzで0.3 μm 程度と非常に厚い成膜が望ましい。使用する金属も導体損を防ぐため導電率の高い、金、銀、銅が望ましい。現在、高屈折率無反射構造、負の屈折率構造[11]への応用を進めている。

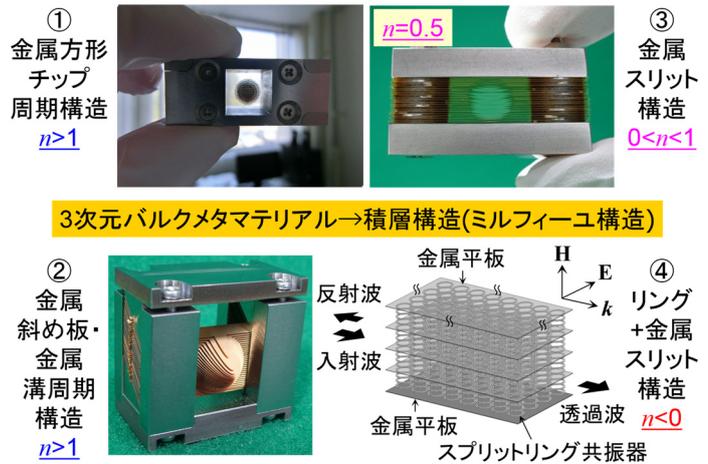


図3 テラヘルツメタマテリアル

② 金属斜め板・金属溝周期構造 ($n > 1$)

金属斜め板構造や金属溝周期構造はマイクロ波帯でのパスレングスレンズやコルゲーション構造のように、人工誘電体としてよく使用されている。TM波で金属平行平板が電磁波の電界成分と垂直である場合には、実効屈折率が1とみなせる。電磁波の進行方向に角度 θ を持たせると実効屈折率 $n=1/\cos\theta$ とみなせ、位相を制御できる。そこで、図3②の通りテラヘルツ波帯パスレングスレンズを設計、作製し、テラヘルツイメージャーにより集光を確認した[12]。

③ 金属スリット構造 ($0 < n < 1$)

図3③の金属スリット構造ではTEモードの速波効果により、屈折率 $0 < n < 1$ を制御できる[13, 14]。また屈折率 $n=0$ では構造中の位相が一樣となるため、出力部の端面形状により波面制御[15]が可能で、空間中を伝搬する湾曲したテラヘルツ波の波面を垂直に整形できる。また最近になり、屈折率 $0 < n < 1$ を有する肉厚な2次元スリット構造[16]でテラヘルツ波の集光が確認された。当研究室では光学素子への応用を意識し、薄い金属板を用いた3次元のテラヘルツ波帯凹レンズを屈折率 $n=0.5$ となるように設計、作製し、テラヘルツイメージャーで集光を確認した[17]。

④ リング+金属スリット構造 ($n < 0$)

負の領域の屈折率を実現する構造として、まずは分割リング共振器と金属細線を用いた構造によるマイクロ波帯の研究が挙げられる[18, 19]。またマイクロ波帯で、導波管に分割リング共振器を装加した構造[20]や金属平行平板に円盤状の誘電体共振器を装加した構造[21]により、負の屈折率を実現し、カットオフ周波数以下でTEモードが伝搬することも報告されている。

現在、当研究室では図3①~③でのテラヘルツ波帯の積層構造(ミルフィューユ構造)の作製ノウハウを活かし、図4の通り分割リング共振器を装加した金属スリットアレーモデルで負の屈折率の設計を進めている[22]。

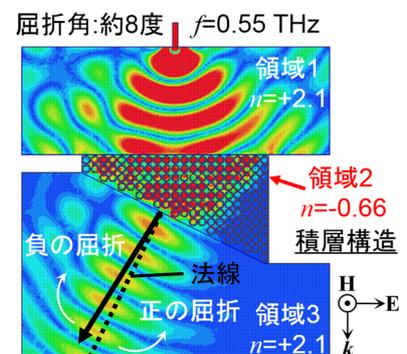


図4 負の屈折率構造(図3の④)

3. テラヘルツ波帯アンテナ

光伝導アンテナ[23, 24]は、2 波長レーザー光やマルチモードレーザーダイオード光からなる光ビームにより、フォトミキサーとしても動作し、単色テラヘルツ波の光源ともなる[25, 26]。フォトミキサーとしての使用の際、光伝導基板上の 2 次元平面内でアレー化を行い、アンテナの入力インピーダンスを高くするなどが報告されている[27, 28]。当研究室では、積層構造八木・宇田型光伝導アレーアンテナを提案[29]し、フォトミキサーへの応用の検討を進めている[30]。

4. テラヘルツ波伝送線路

テラヘルツ波帯の光学素子では、レンズ、偏光子、放射器、検出器と同様に、伝送線路の更なる充実も求められている。サブ波長金属構造による伝送線路は、擬似表面プラズモンポラリトン(表面波)を伝搬できる。現在、当研究室ではダイポールアレー[31]や数 10 μm オーダーの準 3 次元構造体の作製が可能な超微細インクジェット工法[32]の特長を活かしたポストアレー[33]の研究を進めている。

5. まとめ

マイクロ波、ミリ波帯まで含めた様々な研究グループの参考文献とともに、現在、当研究室で進めているメタマテリアルによる光学素子・アンテナの最新の研究進展について報告を行った。より詳細なスライド資料は研究室ホームページ[34]にて公開している。今後、テラヘルツ分野が産業応用に向かう道中、様々な英知が結集され大きな荒波を乗り越える際、ミリ波アンテナが長年を掛け乗り越えてきた「損失との闘い」[35] (“ミリ波方形導波管スロットアレーアンテナ -損失との闘い-”)が 1 つ大きな鍵となる。その際、電気特性だけではなく、材料特性、試作法、試作実現性の注意深い検討がマイクロ波、ミリ波帯以上に一層重要となると考えている。

謝辞

本研究の一部は、総務省 SCOPE(122103011)の委託を受けたものです。本研究を大きく推進してくれた入江克成氏(学部・修士修了 現・茨城県庁)、今野拓矢氏(学部・修士修了 現・日立オートモティブシステムズ株式会社)、與那嶺広樹氏(学部卒業 現・株式会社協和エクシオ)、研究室の学生、スタッフの方々に深く感謝いたします。

また以下の共同研究者の皆様、日頃より貴重なアドバイスを頂いている皆様に深く感謝申し上げます。

萩行正憲教授(大阪大)、高野恵介博士(大阪大)、北原英明博士(大阪大)、谷正彦教授(福井大)、山本晃司准教授(福井大)、永井正也准教授(大阪大)、Withawat Withayachumnankul 博士(アデレード大)、御田護博士(株式会社 M&M 研究所)、舘野貴一様、滝田隆夫様、稲田禎一博士(左記 3 名 日立化成株式会社)、直之進様、John C. Young 博士(ケンタッキー大)、広川二郎准教授(東工大)、安藤真教授(東工大)

参考文献

- [1] J. B. Pendry et al., *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **47**, 2075 (1999).
- [2] 萩行 正憲, テラヘルツテクノロジーフォーラム通信 **7**, 3 (2010).
- [3] R. Shimano et al., *Nature Commun.* **4**, 1 (2013).
- [4] M. Tonouchi, *Nature Photon.* **1**, 97 (2007).
- [5] Y. Kawano and K. Ishibashi, *Nature Photon.* **2**, 618 (2008).
- [6] 河野 行雄, 電子情報通信学会 テラヘルツ応用システム研究会, 講演 8 (2013).
- [7] H. Kanaya, H. Shibayama, R. Sogabe, S. Suzuki, and M. Asada, *Appl. Phys. Express* **5**, 124101 (2012).
- [8] Y. Koyama, R. Sekiguchi, and T. Ouchi, *Appl. Phys. Express* **6**, 064102 (2013).
- [9] H. Kitahara et al., FIT 2012 Pos2.9 (2012).
- [10] Y. Takebayashi et al., *Applied Physics A* **115**, 501 (2013).
- [11] 吉田 武礼 他, 2012 年電子情報通信学会総合大会, C-2-84 (2012).
- [12] T. Togashi et al., META 2014, 1A11 (2014).
- [13] W. E. Kock, *Proc. Inst. Radio Eng.* **34**, 828 (1946).
- [14] W. E. Kock, *Bell Syst. Tech. J.* **27**, 58 (1948).
- [15] A. Alù et al., *Phys. Rev. B* **75**, 155410 (2007).
- [16] R. Menndis et al., *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **58**, 1993 (2010).
- [17] 木村 辰也 他, 2014 年春季 第 61 回 応用物理学関係連合講演会, 18p-E17-7 (2014).
- [18] D. R. Smith et al., *Phys. Rev. Lett.* **84**, 4184 (2000).
- [19] D. R. Smith et al., *Science* **292**, 77 (2001).
- [20] R. Marqués et al., *Phys. Rev. Lett.* **90**, 183901 (2002).
- [21] T. Ueda et al., *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **55**, 1280 (2007).
- [22] 岸 湧大 他, 2012 年秋季 第 73 回 応用物理学関係連合講演会, 11p-B1-1 (2012).
- [23] D. H. Auston et al., *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 284 (1984).
- [24] P. U. Jepsen et al., *J. Opt. Soc. Am. B* **13**, 2424 (1996).
- [25] M. Tani et al., *IEEE Microw. Guided Wave Lett.* **7**, 282 (1997).
- [26] M. Tani et al., *Sci. Technol.* **20**, S151 (2005).
- [27] K. Han et al., *J. Infrared Milli. Terahz Waves*, **31**, 441 (2010).
- [28] I. Woo et al., *Opt. Express*, **18**, 18532 (2010).
- [29] 入江 克成 他, 2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 17p-E8-10 (2012).
- [30] 大内 隆嗣 他, 2014 年春季 第 61 回 応用物理学関係連合講演会, 17p-E17-15 (2014).
- [31] M. Yashiro et al., IRMMW-THz 2013, We P2-62 (2013).
- [32] K. Takano et al., *Appl. Phys. Lett.* **99**, 161114 (2011).
- [33] N. Kojima et al., META 2014, 2P1, P16 (2014).
- [34] <http://suzuki-lab.ee.ibaraki.ac.jp/>
- [35] 広川 二郎, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-1-5 (2008).

事業部紹介

株式会社 アドバンテスト

テラヘルツシステム事業部（事業部長 今村元規）

株式会社アドバンテストは、2004年からテラヘルツ研究に着手し、テラヘルツアプリケーションに向けた技術開発に取り組みました。そして、2010年にCT解析装置であるTAS7000、2012年より超高速掃引の分光装置TAS7500シリーズを販売開始し、その後も光学系をフレキシブルに配置可能なTAS7500TS、廉価版のTAS7400シリーズと相次いで製品を発表してきました。その結果、ビジネスとしての基盤が整備できたことにより、本年4月より当社におけるテラヘルツ担当部署を、新規事業を立ち上げるための新企画商品開発室から、テラヘルツシステム事業部へと改組することになりました。これよりテラヘルツ波応用市場で本格的に事業を進めて参ります。様々な可能性のあるテラヘルツ分野において、我々のチャレンジはまだ道半ばではありますが、これまで我々を導き、また支えていただいた当フォーラム会員の方々には感謝の気持ちでいっぱいです。今後も変わらぬご厚誼を賜りますようお願い申し上げます。

我々テラヘルツシステム事業部は、製品開発、顧客への技術サポート、営業の各機能を含んでおり、現在海外を含め約60名のメンバーが、活動しています。新規事業領域でのビジネス開拓ということで、ここにはテラヘルツの技術者だけでなく、各種アプリケーションの専門家をはじめ様々なエキスパートが所属しています。新しい分野に飛び出すことは大変ですが、そのぶん



達成感も大きく、若い人の成長も楽しみです。私を含め多くのメンバーが、テラヘルツビジネスで忙しく飛び回っており、世の中のテラヘルツの普及と共に我々の事業も拡大させたいと思っています。

開発テーマとしては、製品開発の他に、測定帯域およびダイナミックレンジ拡大等の要素技術開発にも力を入れています。その成果としては、LN導波路により7THzまでの広帯域なテラヘルツ波を発生する技術があります。この広帯域光源モジュールはTAS7500/7400SUに使用され、高域まで良好なSNで測定ができると好評頂いています。

当事業部の開発部門は、当社の半導体試験装置で使用するMEMSや化合物半導体デバイスの生産工場などがあるアドバンテスト仙台事業所を本拠地としています。仙台にお越しの際には、是非お立ち寄り下さい。

(今村元規：motoki.imamura@advantest.com, テラヘルツシステム事業部：info_t@jp.advantest.com)

国内会議・国際会議予定

平成26年度 第1回テラヘルツ技術セミナーのお知らせ

- ◇ 日時： 2014年6月20日(金)
- ◇ 場所： 理化学研究所(仙台市)
- ◇ 詳細・参加申込は、<http://www.terahertzjapan.com/event/2014kenkyukai.html> をご参照ください。

国際会議およびシンポジウム等

- ☑ 7th Global Symposium on Millimeter-Waves (GSMM) 2014
May 21-23, 2014, (Seoul, Korea)
<http://gsmm2014.org/Home>
- ☑ 2th High Temperature Superconductors in High Frequency Fields (HTSHFF)
June 9-12, 2014 (Fréjus, France)
<http://www.trt.thalesgroup.com/ump-cnrs-thales/htshff/>
- ☑ CLEO:2014
June 10-12, 2014 (San Jose, USA)
<http://www.cleoconference.org/home/>
- ☑ International Conferences on Laser Applications in Life Sciences
June 29- July 2, 2014 (Ulm, Germany)
<http://lals2014.ilm-ulm.de/home.html>
- ☑ 2014 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI 2014)
July 6-11, 2014 (Menphis, USA)
<http://www.2014apsursi.org/>
- ☑ 19th International Conference on Ultrafast Phenomena (UP 2014)
July 7-11, 2014 (Okinawa, Japan)
<http://up2014.org/>
- ☑ International Symposium on Frontier of Terahertz Science
August 4-6, 2014 (Okinawa, Japan)
http://science.shinshu-u.ac.jp/~thz/Event2014/event2014_index_Eng.html
- ☑ Applied Superconductivity Conference
August 10-15, 2014 (North Carolina, USA)
<http://ascinc.org/>
- ☑ 31th URSI General Assembly and Scientific Symposium
August 16-23, 2014 (Beijing, China)
<http://www.chinaursigass.com/>
- ☑ The 35th Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)
August 25-28, 2014 (Guangzhou, China)
<http://www.piers.org/piers2014Guangzhou/>
- ☑ Metamaterials' 2014: The 8th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics
August 25-30, 2014 (Copenhagen, Denmark)
<http://congress2014.metamorphose-vi.org/>
- ☑ The 39th International Conference on Infrared, Terahertz and Millimeter Waves (IRMMW-THz 2014)
September 15-19, 2014 (Tucson, USA)
<http://www.irmmw-thz2014.org/>
- ☑ SPIE Security + Defence 2014: Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology

September 22-25, 2014 (Amsterdam, Netherlands)

<http://spie.org/ESD/conferencedetails/millimetre-wave-and-terahertz-sensors-and-technology>

- ☑ SPIE/COS Photonics Asia (Infrared, Millimeter-Wave, and Terahertz Technologies III)

October 9-11, 2014 (Beijing, China)

<http://spie.org/PA/conferencedetails/infrared-millimeter-wave-and-terahertz-technologies>

- ☑ 2014 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2014)

November 4-7, 2014 (Sendai, Japan)

<http://apmc2014.org/index.html>

- ☑ Fifth International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano V)

December 1-5, 2014 (Martinique, France)

<http://nanojapan.rice.edu/teranano5.shtml>

- ☑ 19th International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2014)

December 2-5, 2014 (Kaohsiung, Taiwan)

<http://isap2014.org/>

国内会議および研究会等

- ☑ 平成 26 年度 第 1 回テラヘルツ技術セミナー

日時： 2014 年 6 月 20 日 (金) 13:00~17:30 (施設見学 16 : 30~17:30)

場所： 理化学研究所 仙台地区 1F セミナー室

<http://www.terahertzjapan.com/event/2014kenkyukai.html#entry-form>

- ☑ テラヘルツ科学の最先端

2014 年 8 月 4 日~6 日 (沖縄科学技術大学院大学)

http://science.shinshu-u.ac.jp/~thz/Event2014/event2014_index.html

- ☑ テラヘルツ電磁波技術研究会「若手研究者サマースクール 2014」

2014 年 8 月 18 日~19 日 (木更津 竜宮城ホテル三日月)

<http://annex.jsap.or.jp/terahertz/THzTop.htm>

- ☑ JASIS「テラテクビジネスセミナー」

2014 年 9 月 3 日~5 日 (幕張メッセ国際展示場)

<http://www.jasis.jp/2014/>

- ☑ 日本物理学会秋季大会「物性関係」

2014 年 9 月 7 日~10 日 (中部大学春日井キャンパス)

<http://www.jps.or.jp/>

- ☑ 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会

2014 年 9 月 17 日~20 日 (北海道大学札幌キャンパス)

<http://www.jsap.or.jp/>

- ☑ 電子情報通信学会ソサイエティ大会

2014 年 9 月 23 日~28 日 (徳島大学)

<http://www.ieice.org/jpn/index.html>

テラヘルツテクノロジーフォーラム通信 Vol.12, No.1

発行日 2014 年 05 月 14 日

企画・編集 山本晃司 (福井大学)、林伸一郎 (理化学研究所)、武田正典 (静岡大学)

メール : kohji@fir.u-fukui.ac.jp

発行 テラヘルツテクノロジーフォーラム事務局

〒162-0801 東京都新宿区山吹町 358-5 アカデミーセンター

Tel: 03-5937-0474 Fax: 03-3368-2822

E-mail : teratech-post@bunken.co.jp

<http://www.terahertzjapan.com>