

## テラヘルツテクノロジーフォーラム通信

Vol.13, No.1

## 巻 頭 言

テラヘルツテクノロジーフォーラム研究交流委員会 委員長 谷正彦

昨年はフォーラムにとって大変悲しいできごとがありました。いうまでもなく、萩行正憲会長の急逝です（フォーラム通信 Vol.12, No.2 の巻頭ページ参照）。日本においてテラヘルツ時間領域分光やテラヘルツ波光源の研究が活発になったのは 1990 年代後半からですが、その当時から独創的な発想と、深い学術的理解に基づく研究活動で、この分野をリードされてこられました。また研究室で薫陶をうけた多くの学生や研究者が、テラヘルツ波科学を中心とする分野で活躍しています。また萩行先生から技術指導を受けたテラヘルツ波関連の企業も数多いと思います。最近では科研費の新学術領域研究「電磁メタマテリアル」の代表としてテラヘルツ帯のメタマテリアル研究に意欲的に取り組んでおられました。このようにこの分野で多大な貢献をされた萩行先生を失ったことは、フォーラムのみならず、コミュニティ全体にとって大変な損失でした。また私自身も萩行先生には負うところが大きく、残念な気持ちでいっぱいです。萩行先生が生前、心を砕いておられたフォーラムの発展とテラヘルツテクノロジー分野の発展に微力ながら努力を惜しまないことが、その恩に報いる道だと考えています。

さて、萩行会長が急逝されたあと、小宮山副会長が会長代行としてフォーラム運営の指揮をとられましたが、今年度は会長、副会長などの理事会メンバーを少なからず変更し、新体制でその運営に臨む予定です（詳細は 2015 年度総会にて報告致します）。また、今年度はフォーラムと日本学術振興会テラヘルツ波科学技術と産業開拓第 182 委員会が主催して FTT 2015 (The Second International Symposium on Frontiers in THz Technology) を 8 月 30 日から 9 月 2 日の期間、浜松で開催予定です。前回の FTT 2012 よりは少し規模を縮小して開催することになっていますが、一般投稿論文が 79 件あり、国際光年を記念した特別セッションや萩行先生の追悼セッションなどが企画されています。IRMMW-THz の開催は 3 年に 1 回、アジア・太平洋地域で開催されることになっていますが、2018 年が次のアジア・太平洋地域での開催年に当たります。現在、国内の主だった研究者とともに IRMMW-THz2018 の日本での開催誘致の活動を行っていますが、フォーラムは支援団体としてその活動をサポートする予定です。すでに日本開催の提案を IRMMW-THz の国際組織委員会 (IOC) に提出しています。今年 8 月下旬に香港で開催される IRMMW-THz 2015 の会期中に開催される IOC で審議され、可否が決定する予定です。2015 年度からの新運営体制のもと、これらのイベントと事業を成功させるため、引き続き皆様のご協力、ご支援をお願い致します。

これまで我々が進めてきたテラヘルツ波時間領域分光法による物性測定と観測領域を広げる試みについて紹介する。テラテク通信のこれまでの記事ではテラヘルツ技術の解説や紹介が多かった印象があり、本稿では物性物理への適用について最初に紹介し、後半で広帯域化の技術的な側面に触れる。

物性物理学におけるテラヘルツ技術の位置づけであるが、出力の高強度化によって、物性の観測だけでなく、その制御も視野に入れて大きく広がりを見せている<sup>1-4)</sup>が、ここでは分光実験によって物性を評価した結果を紹介する。その場合のテラヘルツ波時間領域分光法の特徴は、(A)可視-近赤外域に比べて周波数が低いことから電気伝導に直接関係する光学伝導度の測定が可能であること、(B)電場の時間応答が得られることから光学伝導度や誘電率といった応答関数の実部と虚部が同時に分かること、(C)時間幅がピコ秒程度のパルス電磁波を使うことから高い時間分解能をもってキャリアなどの振る舞いの時間変化を追跡できること、などである。

(A)については、電極付けなしに伝導特性を評価することができるのが大きな利点である。電極の善し悪しによらず、また、そもそも電極付けが困難な微小な物質の伝導特性を調べるのに威力を発揮する。以下では、物性物理の中心課題である相転移が伝導現象に顔を出す例、金属-絶縁体転移について紹介する。その舞台となる物質は、強相関電子系の代表例である遷移金属酸化物である。こうした物質系は、物質の性質を特徴付けるパラメータ、例えば、(物質を構成する各原子が存在するサイトを電子が遍歴

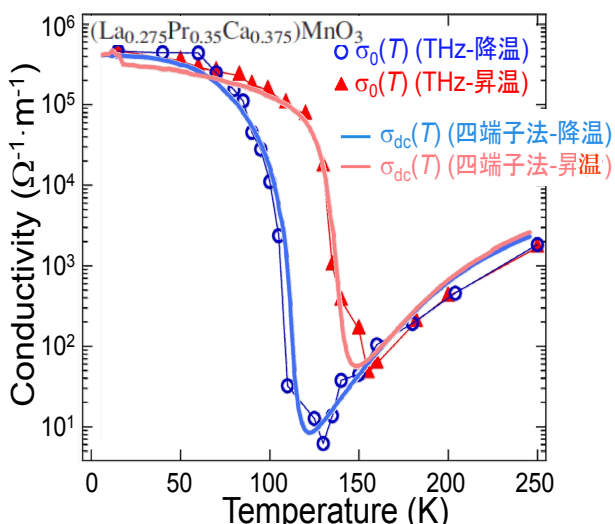


図1 電気伝導度の温度変化  $\sigma_0$ はTHz分光で求めた直流伝導度で、○は降温時▲は昇温時の結果、 $\sigma_{dc}$ は四端子法で計測した直流伝導度で、青太線は降温時、赤太線は昇温時のデータを示す。

する程度を示す) トランスファーエネルギーと(同一サイトに電子が2つ収容されたときに生じる反発エネルギーで、電子が物質内を遍歴することを阻害し、局在化をもたらす)電子相関エネルギーが拮抗し、温度や磁場などの環境を少し変化させるだけで、金属-絶縁体転移が生じる。転移の際、桁違いに大きな伝導度の変化が生じることから盛んに研究されており、応用に関しても、スイッチ、メモリーやセンサーへの適用が期待されている。我々は強相関電子系の代表例であるマンガン

酸化物  $(La,Pr,Ca)MnO_3$  薄膜において、図1に示すように金属状態と絶縁体状態を跨いだ伝導変化を捉えることに成功した<sup>5)</sup>。低温における金属状態から100 K付近以上で絶縁体状態へ転移する途中では、金属ドメインと絶縁体ドメインが共存しているため、その共存状態を反映して抵抗値が数桁変化している。また、降温と昇温で振る舞い

が異なるヒステリシスが見られる。電極による直流伝導度  $\sigma_{dc}$  とテラヘルツ波の透過測定から得られた光学伝導度  $\sigma(\omega)$  で  $\omega \rightarrow 0$  に外挿した値  $\sigma_0$  はよく一致しており、測定手法を確立できた。なお、詳細は省略するが、複素光学伝導度スペクトルが得られることに、特徴(B)を使っている<sup>3)</sup>。現在は電極付けが困難なナノ構造物質などの伝導特性評価への適用を試みている。

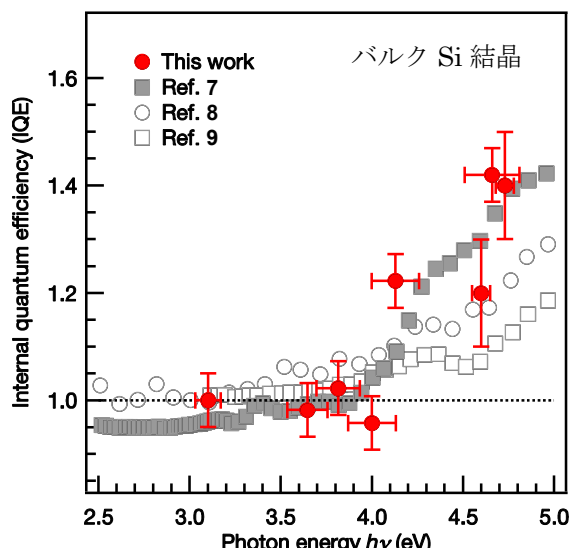


図2 内部量子効率(1つの入射光子に対して何個の電子・正孔ペアが生成するか)の励起光エネルギー依存性。電極による光伝導測定これまでの文献値も示す。

一方、先に述べた特徴(C)を活かすと、光を照射して生成された電子や正孔が時間経過と共にどのような振る舞いを示すかを追跡できる。その時間分解能はピコ秒程度以下であり、エレクトロニクスを使う手法よりも格段に優れている。これを利用して、太陽光発電の高効率化を調べた結果を報告する<sup>6)</sup>。通常は材料に電極を取り付けて光伝導測定が行われるが、先の例と同様、伝導測定はテラヘルツ波時間領域分光を用い、励起光としてはフェムト秒パルスを使うと、励起光照射から時間を遅らせてテラヘルツ波を入射させる(いわゆる光ポンプ-テラヘルツ分光)手法で、キャリアの時間変化を追跡できる。我々は最もよく知られた材料であるバルク Si を取り上げ、その表面処理の相違によるキャリアの時間応答の違いを見出す一方、光照射直後では生成されたキャリア数は試料依存性を示さないことを見出した。これにより、電極から電流が取り出される効率とは異なる、原理的な光電変換の効率の最大値が推測できることになる(図2の Ref.7-9 のデータが一致しないように、電極による光伝導測定は試料依存性が大きい)。また、図2に示すように、光子エネルギーが閾値(この場合は4 eV)を超えると、キャリアの生成効率が1を超える、いわゆるキャリア増殖が生じていることも確認した。この結果は、電極や構造等に細心の注意を払った光伝導測定結果<sup>7)</sup>とほぼ一致しており、測定手法の確立ができたものと考えられる。今後、ナノ構造の光電変換効率を明らかにしていく予定である。

ここまではテラヘルツ帯の光学伝導度の測定から、直流伝導度の評価やキャリアの時間応答を調べた結果を紹介した。時間領域分光法による観測領域の高帯域化によって格子振動(フォノン)やバンド端付近の応答を同時に測定できれば、電子と格子の相互作用や電子励起とキャリア応答の関係などを明らかにできる。そうした研究には、従来の数百 GHz から数 THz までをカバーする時間領域分光法のさらなる広帯域化が必要である。以下では、広帯域化の現状について、以前テラテク通信で紹介した取り組み<sup>10)</sup>のその後の進展について簡単に報告させて頂く。

発生・検出に用いるレーザーのパルス幅が狭いほど広帯域化には有利であるため<sup>3,4)</sup>、以前の10 fs から5 fs に狭窄化されたチタンサファイアレーザーを使った。そして、発生に光学非線形性の大きな有機結晶 DAST を<sup>11)</sup>、検出には以前と同様の光伝導アンテナを用いた結果が図3である<sup>12,13)</sup>。時間応答

を示す(a)では複雑な信号波形になっているものの、数 fs の周期の信号が観測できており、そのフーリエ変換(b)が示す通り、アンテナを用いた検出で 190 THz 付近まで観測できている。(なお、発生した赤外光の最大周波数が 200 THz 以上まで及んでいることは確かめている。) テラヘルツ波時間領域分光法としては世界最高帯域であって光通信波長に肉薄することができており、実用化が期待されているテラヘルツ通信と現代のインターネット社会を支えている光通信をつなぐことができる技術であると考えている。

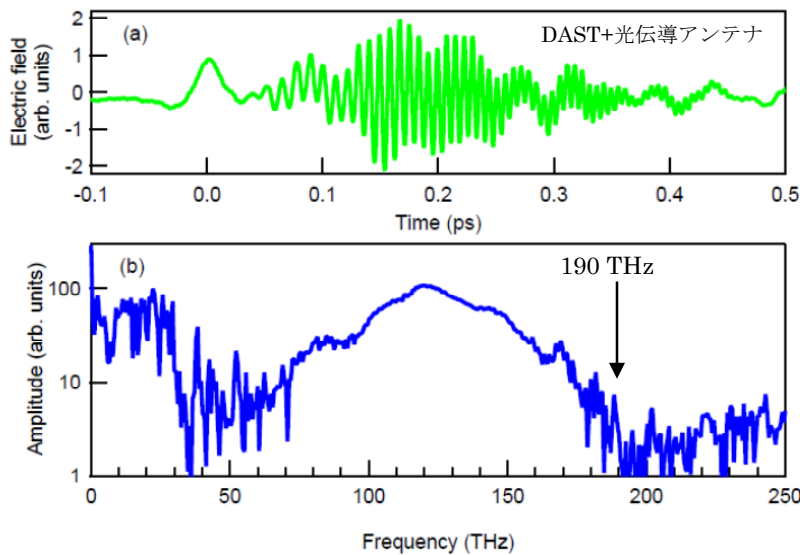


図 3 (a) 5 fs レーザーと DAST 及び光伝導アンテナを組み合わせ得た電場の時間応答の例 (b) (a)のフーリエ変換振幅スペクトル

一方、ここ数年で、空気プラズマを用いた発生・検出が急速に進展した。この場合、繰り返しが 1 kHz 程度の高強度レーザーを用いる必要があるが、半導体や有機結晶などを使う方法と比べて、それらの格子振動等の吸収の影響を受けないため、不感帯がない真の広帯域化が実現できる。我々は近赤外レーザーの超短パルス化でよく用いられるホローファイバーを使って、強度が mJ 程度で中心波長 800 nm のパルス光(とその二倍高調波)を空気に集光することで 200 THz に至る広帯域発生<sup>14)</sup>と、それを空気で検出する ABCD と呼ばれる手法で 150 THz まで電場検出することに成功した<sup>15)</sup>。他の手法も含めた広帯域化の現状を表 1 にまとめる。詳細は Ref. 15 を参照頂きたい。これらの結果を外挿して考えると、例えば 5 fs レーザーを使って空気プラズマで電磁波を発生すれば、400 THz、波長にして 775 nm の可視域に至るまでカバーできることになる。今日、3 fs を切るパルスの発生は可能であり、単純計算では 465 nm を切る波長、すなわち可視全域のカバーも不可能ではないと考えられる。可視域での分光との融合も将来的には可能となるであろう。

表 1 広帯域化の現状 帯域の欄の括弧内は、時間領域分光しない場合の発生周波数の最大値を示す。また、そのデータを示した文献は、文献欄の括弧内に示す。

発生源	検出器	帯域 (THz)	パルス幅(fs)	文献
GaSe (厚さ 30 μm)	ZnTe (厚さ 10 μm)	100	10	16
光伝導アンテナ	光伝導アンテナ	25	10	17
GaSe (厚さ 30 μm)	光伝導アンテナ	100	10	17
DAST (厚さ 150 μm)	光伝導アンテナ	190 (200)	5	13 (11)
空気プラズマ	空気プラズマ	150 (200)	10	15 (14)

本稿に関する主たる共同研究者は、物性測定に関しては永井正也阪大准教授、広帯域化に関しては松原英一大阪歯科大講師及び片山郁史横浜国大准教授である。また、酸化物薄膜の研究は阪大産研の田中秀和教授と服部梓助教らとの、Siの光電変換の研究は京大化研の金光義彦教授らとの共同研究である。最後に、折に触れてご激励頂いた阪井清美元会長、故萩行正憲前会長らテラヘルツテクノロジーフォーラムの先生方に心から感謝する。

## 参考文献

1. 永井正也、テラテク通信 Vol. **5**, No.2 (2007).
2. I. Katayama, H. Aoki, J. Takeda, H. Shimosato, M. Ashida, R. Kinjo, I. Kawayama, M. Tonouchi, M. Nagai and K. Tanaka, Phys. Rev. Lett. **108**, 097401 (2012).
3. I. Katayama and M. Ashida, *Frontiers in Optical Methods: Nano-Characterization and Coherent Control*, (K. Shudo, I. Katayama and S. Ohno (Eds.)), Springer Series in Optical Sciences Volume 180, 167, Springer (2013).
4. 芦田昌明、光科学の世界 (大阪大学光科学センター 編集) 4.3, 朝倉書店 (2014).
5. T. V. A. Nguyen, A. N. Hattori, M. Nagai, T. Nakamura, K. Fujiwara, M. Ashida and H. Tanaka, Appl. Phys. Lett. **105**, 023502 (2014).
6. G. Yamashita, E. Matsubara, M. Nagai, Y. Kanemitsu and M. Ashida, Appl. Phys. Lett. **105**, 231118 (2014).
7. M. Wolf, R. Brendel, J. H. Werner, and H. J. Queisser, J. Appl. Phys. **83**, 4213 (1998).
8. O. Christensen, J. Appl. Phys. **47**, 689 (1976).
9. F. J. Wilkinson, A. J. D. Farmer, and J. Geist, J. Appl. Phys. **54**, 1172 (1983).
10. 芦田昌明、テラテク通信 Vol. **4**, No.1 (2006).
11. I. Katayama, R. Akai, M. Bito, H. Shimosato, K. Miyamoto, H. Ito and M. Ashida, Appl. Phys. Lett. **97**, 021105 (2010).
12. I. Katayama, R. Akai, M. Bito, E. Matsubara and M. Ashida, Optics Express, **21**, 16248 (2013).
13. M. Ashida, E. Matsubara and I. Katayama, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Vol. 8964, (2014).
14. E. Matsubara, M. Nagai and M. Ashida, Appl. Phys. Lett. **101**, 011105 (2012).
15. E. Matsubara, M. Nagai and M. Ashida, J. Opt. Soc. Am. B, **30**, 1627-1630 (2013).
16. R. Huber, F. Tauser, A. Brodschelm, M. Bichler, G. Abstreiter, and A. Leitenstorfer: Nature, **414**, 286 (2001).
17. M. Ashida, Jpn. J. Appl. Phys. **47**, 8221 (2008).

## 会社紹介

### 浜松ホトニクス株式会社（中央研究所 高橋宏典）

浜松ホトニクスは、創業以来「光」を追求して、高い技術力を背景とした他社にない製品の開発を目指して事業を進めています。光に粒子と波動の二面性があるように、当社は研究開発型企業として、光に関する未知未踏を追求しつつ、光部品・モジュールなどの製品を世界中の大学・企業に提供して、光産業の拡大に貢献することを目指しています。

テラヘルツ(THz)波は、まさに人類未知未踏の波長領域です。弊社では、THz 波の研究を実施するとともに<sup>1,2,3,4)</sup>、THz の研究・応用に役に立つ製品に取り組んでいます。ここでは、その製品のいくつかをご紹介します。

テラヘルツ波発生・検出モジュールは、THz 波用伝導型素子と THz 波レンズの一体型モジュールです。素子と THz 波用レンズとがアライメント済みであり、他機器との接続が容易です。高出力タイプ G13080 も販売しています（写真 1）。応用計測に利用できる分光分析装置として、減衰全反射(ATR)分光専用の装置 C12068 を販売しています(写真 2)<sup>3)</sup>。小型・省スペースに設置でき、測定環境中の水蒸気の影響を受けないで計測できるという特長を有しています。

その他、THz 関連の研究に適用できる装置として、インテリジェントビジョンセンサ (IVS) とマイクロチップレーザーがあります。IVS は、画像検出 ⇒ 認識 ⇒ 制御信号出力 までを、1 ms オーダーで行う高機能・画像処理センサです。fs レーザーを利用した THz イメージングにおいて、E-O サンプルング法で画像を取得する時、コンピュータと組合せて差分画像を高速に取得し高い S/N を実現できます<sup>1,5)</sup>。マイクロチップレーザーは、レーザー共振器を一体型にしたコンパクトな受動 Q スイッチ型の短パルスレーザーであり、パルス幅が 500 ps と短い縦シングルモードタイプをラインナップしていることが特長です。非線形光学結晶 LN を用いたパラメトリック波長変換による THz 発生<sup>6)</sup>、THz 検出<sup>7)</sup>に適しています。

国際光年の今年 2015/8/30～9/2、アクトシティ浜松において、当フォーラムと学振 182 委員会の共催によって国際会議 FTT2015 が開催されます。多くの皆さまによる活発な討論によって、THz 波技術がますます発展することを期待しています。

(URL: [www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com)、高橋宏典 : [hironori@crl.hpk.co.jp](mailto:hironori@crl.hpk.co.jp))



写真 1 テラヘルツ波発生・検出モジュール  
高出力タイプ G13080



写真 2 テラヘルツ波分光分析装置  
C12068

## References

- 1) T. Yasuda *et al.*, Opt. Express **15**, 15583 (2007).
- 2) Y. Kawada *et al.*, Opt. Lett. **33**, 180 (2008).
- 3) A. Nakanishi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **83**, 33103 (2012).
- 4) Y. Kawada *et al.*, Opt. Lett. **39**, 2794 (2014).
- 5) F. Miyamaru *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **43**, L489 (2004).
- 6) Shin'ichiro Hayashi *et al.*, Scientific Reports **4**, 5045 (2014).
- 7) K. Nawata *et al.*, Appl. Phys. Lett. **104**, 91125 (2014).

## 国内会議・国際会議予定

### テラヘルツテクノロジーフォーラム主催・協賛会議

#### 2015年度（平成27年度）総会および第13回講演会

- ◇ 日時： 2015年5月19日（火） 13:30～17:00
- ◇ 場所： 国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT) 本部

#### 国際シンポジウム「テラヘルツテクノロジーの最前線 2015」

(International Conference on Frontiers in Terahertz Technology (FTT2015))

- ◇ 日時： 日時 2015年8月30日（日）～9月2日（水）
- ◇ 場所： アクトシティ浜松コンgresセンター（浜松市）
- ◇ 参加登録（早割） 締切：2015年7月15日
- ◇ URL: <http://ftt2015.com>

#### 合同国際シンポジウム「第3回ミリ波とテラヘルツ波の科学と応用に関する国際シンポジウム (MTSA 2015)」および「第5回テラヘルツナノ科学に関する国際シンポジウム (Teranano 2015)」

- ◇ 日時 2015年6月30日（火）～7月4日（土）
- ◇ 場所： 沖縄科学技術大学院大学 (OIST) メインキャンパス
- ◇ URL: <https://groups.oist.jp/ja/cws/oist-workshops-2015>

### 国際会議およびシンポジウム等

- ☑ International Microwave Symposium 2015  
May 17-22, 2015 (Phoenix, Arizona)  
<http://www.ims2015.org/>
- ☑ THz Security Workshop  
May 29th, 2015 (Davos, Switzerland)  
[http://www.ptb.de/emrp/thz\\_security.html](http://www.ptb.de/emrp/thz_security.html)
- ☑ German THz Conference 2015  
June 8-10, 2015 (Dresden, Germany)  
<http://www.hzdr.de/db/Cms?pNid=3362>
- ☑ TechConnect: Photonic Materials & Device  
June 14-17, 2015 (Washington, DC, USA)  
[http://www.techconnectworld.com/World2015/sym/Photonic\\_Materials\\_Devices.html?s=39](http://www.techconnectworld.com/World2015/sym/Photonic_Materials_Devices.html?s=39)
- ☑ CLEO/Europe-EQEC 2015  
June 21-25, 2015 (Munich, Germany)  
<http://www.cleoeurope.org/>
- ☑ The 36th Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)  
July 6-9, 2015 (Prague, Czech Republic)  
<http://www.piers.org/piers2015Prague/>
- ☑ 15th International Superconductive Electronics Conference (ISEC)  
July 6-9, 2015 (Nagoya University, Nagoya, Japan)  
<http://isec2015.org/>
- ☑ 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting (APS/URSI 2015)  
July 19-25, 2015 (Vancouver, British Columbia, Canada)  
<http://www.2015apsursi.org/default.asp>
- ☑ IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications (NEMO2015)  
August 11-14, 2015 (Ottawa, Canada)

<http://nemo-ieee.org/>

- ☑ META'15, the 6th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics  
August 4-7, 2015 (New York, USA)  
<http://metaconferences.org/ocs/index.php/META15/META15>
- ☑ The 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2015)  
August 23-28, 2015 (Hong Kong)  
<http://www.irmmw-thz2015.org/>
- ☑ The 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2015)  
August 24-28, 2015 (Busan, Korea)  
<http://www.cleopr2015.org/>
- ☑ The 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwave and Optics (Metamaterials'2015)  
September 7-12, 2015 (University of Oxford, United Kingdom)  
<http://congress2015.metamorphose-vi.org/i>
- ☑ 8th UK-Europe-China Workshop on mm-Waves and THz Technologies (UCMMT-2015)  
September 14-16, 2015 (Cardiff, UK)  
<http://sites.cardiff.ac.uk/ucmmt2015/>
- ☑ International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2015)  
November 9-12, 2015 (Hobart, Tasmania, Australia)  
<http://isap2015.org/>
- ☑ Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2015)  
December 6-9  
<http://www.emfield.org/apmc2015/index.php>
- ☑ Symposium: Advances in Terahertz Spectroscopy and Imaging at Pacificchem  
December 15, 2015 (Honolulu, Hawaii, USA)  
<http://www.pacificchem.org/technical-program/abstracts/>
- ☑ The 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2016)  
April 11-15 2016 (Davos, Switzerland)  
<http://www.eucap2016.org/>

#### 国内会議および研究会等

- ☑ 第76回応用物理学会秋季学術講演会  
2015年9月13日～16日 (名古屋国際会議場)  
<http://meeting.jsap.or.jp/index.html>
- ☑ 日本物理学会 2015年秋季大会 (物性)  
2015年9月16日～19日 (関西大学 千里山キャンパス)  
<http://www.jps.or.jp/activities/meetings/index.php>

#### テラヘルツテクノロジーフォーラム通信 Vol.13, No.1

発行日 2015年05月12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)、鈴木健仁 (茨城大学)  
メール : [kohji@fir.u-fukui.ac.jp](mailto: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](mailto:teratech-post@bunken.co.jp)  
<http://www.terahertzjapan.com>