

**研究成果展開事業**  
**ー産学共創基礎基盤研究プログラムー**  
**(産学共創)**

**技術テーマ**  
**「テラヘルツ波新時代を切り拓く**  
**革新的基盤技術の創出」**

**技術テーマ中間評価用資料**

平成 28 年 1 月



## 1. 技術テーマ

### 「テラヘルツ波新時代を切り拓く革新的基盤技術の創出」(平成 22 年度発足)

テラヘルツ波研究においては、我が国が培ってきた光科学や超高速エレクトロニクスをを活かし、我が国が世界の先頭を走る分野になっている。本技術テーマでは、新たに展開してきているテラヘルツ科学・技術の基礎的な活動を、工学、理学、医学、薬学、農学 などの研究開発分野、広範な産業分野に適用し、革新的な展開をはかる糸口を明らかにすることである。テラヘルツ波の新時代を切り拓くための要素技術のブレークスルーを、しっかりとした学術的根拠に基づきながら成し遂げることは重要である。この基礎的研究を社会への普及・貢献に繋げるテラヘルツ波産業応用には、異なった複数の視点でブレークスルーをいくつも生み出し続けなければ達成できない。産学共創のプロジェクトでは、この確立に取り組んできている。

特に、産業形態が未成熟なテラヘルツ波産業において、普遍的な将来展開を図れるような斬新な提案が期待している。研究結果の直ぐなる応用展開を必須とはしないが、常にどのような展開が将来できるかをまず研究者自身が理解し、従来技術との比較や差別化を明確にしながら推進する。産業界と研究者との対話の場「産学共創の場」や、アドバイザーの幅広い見識を活用することにより、産業界の基本的ニーズを共有し、世界をリードする基礎的な研究に反映させる。この分野は様々な学問と技術の融合分野であり、幅広い学際的な取り組みも重要であるので、これまでテラヘルツ波技術と連携の希薄な分野への展開にも十分配慮する。テラヘルツ波により、これまでに見えなかつたり見ることが極めて難しかった情報を可視化することで、新たな情報から我々の安全な生活や産業の活動に利用することが期待される。これは産業界がテラヘルツ波の応用でもっとも期待している分野でもある。

## 2. プログラムオフィサー (PO)

伊藤 弘昌 (東北大学 名誉教授)

### 3. 採択課題

採択年度	研究代表者名	中間・事後評価時の所属及び役職	研究課題名
平成22年度 (26.3了)	山下 将嗣	理化学研究所 基幹研究所 研究員	<b>20100212</b> テラヘルツ波を用いたアモルファス薄膜のキャリア輸送特性非破壊評価技術の開発
平成22年度 (26.3了)	保科 宏道	理化学研究所 基幹研究所 研究員	<b>20100210</b> テラヘルツ分光による高分子構造の解明と操作
平成22年度 (26.3了)	廣本 宣久	静岡大学 創造科学技術大学院 教授	<b>20100209</b> 1 THz 帯高検出能常温検出器技術の研究
平成22年度 (26.3了)	永井 正也	大阪大学 大学院基礎工学研究科 准教授	<b>20100219</b> 極限的高効率 THz パルス発生技術の確立と高性能物質-THz 結合デバイスとの融合と応用
平成22年度 (27.3了)	斗内 政吉 交代 紀和 利彦	大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター 教授 岡山大学 自然科学研究科 准教授	<b>20100205</b> レーザー走査型テラヘルツイメージングシステムの開発と応用分野開拓
平成22年度 (27.3了)	小川 雄一	京都大学 農学研究科 准教授	<b>20100202</b> テラヘルツ波を用いた革新的次世代細胞計測・操作のための基盤技術の開拓
平成22年度 (27.3了)	安井 武史	徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部 教授	<b>20100211</b> 国家標準にトレーサブルなコヒーレント周波数リンクの創生とそれに基づいたテラヘルツ周波数標準技術の系統的構築
平成22年度 (27.3了)	水津 光司	千葉工業大学 工学部 教授	<b>20100204</b> テラヘルツ・エバネッセント波による複素誘電率分光計測
平成22年度 (28.3了)	浅田 雅洋	東京工業大学 大学院 総合理工学研究科 教授	<b>20100201</b> 共鳴トンネルダイオードによる超小型・高効率の室温テラヘルツ発振器の研究
平成22年度 (28.3了)	川瀬 晃道	名古屋大学 エコトピア科学研究所 教授	<b>20100203</b> 先端非線形フォトニクステラヘルツ発生/検出技術の開発
平成22年度 (28.3了)	富永 圭介	神戸大学 分子フォトサイエンス研究センター教授	<b>20100206</b> 凝縮相テラヘルツ分子科学の深化
平成22年度 (28.3了)	平山 秀樹	理化学研究所 テラヘルツ量子素子研究チーム チームリーダー	<b>20100208</b> THz 量子カスケードレーザの動作高温化と周波数拡大に関する研究

平成26年度	伊藤 弘	北里大学 一般教育部自然科学教育センター 教授	20100215 ヘテロバリアダイオードを用いたテラヘルツ波イメージャーの開発
平成26年度	河野 行雄	東京工業大学 大学院理工学研究科 准教授	20100214 ナノカーボン材料を用いた新規テラヘルツ検出器の開発
平成26年度	佐藤 春実	神戸大学 大学院人間発達環境学研究科 准教授	20100216 テラヘルツイメージング分光による高分子材料の劣化の可視化と深さ方向分析
平成26年度	渡邊 紳一	慶應義塾大学 理工学部 准教授	20100213 テラヘルツ時間領域分光ポーラリメータの開発と産業応用展開
平成27年度	梶原 優介	東京大学 大学院工学系研究科 准教授	20100221 エバネッセント波のナノスコーピーによる新規物質計測法の開拓
平成27年度	加藤 和利	九州大学 大学院システム情報科学研究所 教授	20100218 大規模半導体モノリシック光集積技術によるテラヘルツギャップの打破
平成27年度	谷 正彦	福井大学 赤外領域開発研究センター 教授	20100220 テラヘルツ波の超高感度電気光学サンプリング法の開発
平成27年度	永井 正也	大阪大学 大学院 基礎工学研究科 准教授	20100219 テラヘルツレーザー脱離イオン化法の開拓
平成27年度	平川 一彦	東京大学 生産技術研究所 教授	20100218 MEMS 共振器構造を用いた非冷却・高感度・高速テラヘルツボロメータの開発

#### 4. 技術テーマのねらい（目標）

テラヘルツ波は光波と電波の狭間にあり、基本となるその発生・検出技術の研究もフォトニクスおよびエレクトロニクスの両サイドからすすめられているが、どちらも効率が本質的に低下する厄介な領域である。そのため、学術活動自体ほとんどこの20年余で立ち上がってきた新しい分野であり、産業基盤は世界的に未だ確立されていない。現在でもその活動は計測装置、発生装置など、研究開発用のものが主体である。このような中で学術活動分野での我が国の貢献は顕著であり活発な研究が成されてきているとともに、真の産業応用のための産業界自体の期待や関心も極めて高い。

産業展開がこのようなアーリーステージの技術テーマであることから、科学に基づく革新的な基盤技術により要素技術を創出し、テラヘルツ波新時代を我が国から切り拓くことは極めて重要である。この制度の特徴である産業界と研究者との対話の場「産学共創の場」を活用することにより、産業界の基本的ニーズを共有し、世界をリードする基礎的な研究に反映することを目指している。一方産業界の期待と研究者の研究好奇心や意欲の一致、そして何よりも世界との競争に今後うち勝てるような課題と開発研究を、共創の場やアドバイザーからの指導で行っている。求める課題は大きく次の4つになる。

## 1. 高性能テラヘルツ波光源およびテラヘルツ波検出

テラヘルツ波光源については、世界の主流は超短光パルスによる半導体キャリアの振動や光整流による応答から発生する時間パルスの応答をフーリエ変換してスペクトルや位相情報を得る時間領域分光（TDS）法が広く用いられている。一方、量子カスケードレーザー（QCL）に代表される多くの新規なデバイスは単色のテラヘルツ波を直接狭帯域のスペクトルで発生するものが多い。本プロジェクトでは、新たな発想による高性能で広帯域な室温動作の光源の展開を強く期待している。特に冷却を必要としない小型デバイスは産業応用にとり重要な点である。

テラヘルツ波検出も産業応用にとって光源と同様重要な課題である。特に単色のテラヘルツ波を高感度で受光したり、イメージとして表示する装置開発は必須である。このための、高感度、高速、そして室温で動作できる検出器が求められる。

## 2. テラヘルツスペクトル情報の解明

テラヘルツ帯には物質固有のスペクトルが現れることが多い。このスペクトルが何に起因するものかの学問的裏付けは、テラヘルツ波の産業応用に欠かせない問題である。分子の回転、分子内及び分子間の振動や水素結合等について、固体、液体、気体について明確にすることが求められる。

## 3. テラヘルツ計測法及びそのデバイス開発

テラヘルツ波と物質との相互作用を通じて物質情報を正確に取得するための新たな計測法や、そのためのデバイス開発は展開に欠かせない。同時に高度に発展している光通信デバイスなどの光ファイバー利用も産業応用には欠かせない点である。

## 4. 新分野応用開拓

テラヘルツ波を用いることにより、これまでに見えなかったり、見るのが極めて難しかった情報を可視化することで、我々の豊かな生活や産業活動において利用することが期待される。これは産業界がテラヘルツ波の応用でもっとも期待している分野であり、基礎科学から、工学、理学、医学、薬学、農学 などに関連する研究開発分野、そして広範な産業分野での革新的な展開が導く。

**テラヘルツ波の新時代を切り拓くための要素技術のブレークスルーを、論理的な根拠に基づく学の基礎的研究で成し遂げるにより、普遍的な将来展開を図れるような、斬新な研究課題を推進する。**

## 5. 研究課題の選考について

### 研究課題の選考方針

テラヘルツ波によるセンシングやイメージングは、産業界がテラヘルツ波応用でもっとも期待している分野である。テラヘルツ波を用いることで、これまで見ることや見分けることのできないものが識別できるようになれば、基礎科学から、工学、理学、医学、薬学、農学 などに関連する研究開発分野や、広範な産業分野での革新的な展開が期待される。学術的な根拠に基づく学の基礎研究から生み出される新情報の取得技術など、新たな産業展開が期待できる。上述の4課題について研究提案を募集し、その選考には産業界および学術界で豊富な経験を持つアドバイザーと行っている。

テラヘルツ研究では、世界的にキラーアプリケーションが現在でも見出されていない。このため選考するテーマも先入観を持たずに前項に述べたように基礎的なものから応用まで、この分野の産業基盤となりかつ我が国の独自性あるシーズを幅広く、かつ慎重に選考してきた。年度ごとのテ

マの選考推移を別表に示す。採択総テーマ数は21（終了及び進行中の全て）であり、それらを前述の4つの技術テーマごとに分類すると、次のようになる。

1. 高性能テラヘルツ波光源及びテラヘルツ波検出 : 7 課題
2. テラヘルツスペクトル情報の解明 : 3 課題
3. テラヘルツ計測法及びそのデバイス開発 : 5 課題
4. 新分野応用 : 6 課題

基礎的なスペクトル情報解明のテーマも取り上げながら、産業展開が図られる技術テーマへの分布は、はじめから意図して行ったわけではないが望ましい分布であると思う。

7.(2) 節の「技術テーマの見直し および研究継続の評価基準」でも述べるが、選考と共に推進している各研究課題の評価を、産業展開への可能性の面からも厳しく行ってきた。特に 22 年度採択の全 12 件の課題を中間評価時（H25.2）に研究内容および産業展開の可能性を考慮して慎重に審査した。その結果、研究期間を3年、4年、5年の3グループに分けた。産業展開はスピード感が重要であることから、学術的には優れた成果であっても産業化には時期早尚であったりするテーマでは、この評価で希望研究期間の短縮を行った。その結果、研究グループの再募集によりプログラムの流動性が増し、マンネリ化せずに活性化を図るとともに、終了した研究者はいち早く次の研究活動に移行し、一層の研究成果に結び付けている。

## 6. アドバイザーの構成について

アドバイザー名	現在の所属	役職	任期
今村 元規	(株) アドバンテスト テラヘルツシステム事業部	事業部長	平成 23 年 2 月～(継続)
上原 譲	アイシン精機(株) イムラレーザー事業推進部	部長	平成 23 年 2 月～(継続)
宇佐美 隆生	名古屋工業大学大型設備基盤センター 元(株)三菱化学技術研究センター	プロジェクト研 究員 元取締役	平成 27 年 4 月～(継続)
榎木 孝知	NTT エレクトロニクス(株) ブロードバ ンドシステム・デバイス事業本部 光システム事業ユニット	事業部長	平成 23 年 2 月～(継続)
小宮山 進	東京大学	名誉教授	平成 23 年 2 月～(継続)
田中 耕一郎	京都大学 理学研究科	教授	平成 23 年 2 月～(継続)
戸部 昭広	(株) レナサイエンス 元旧三菱ウェルファーマ	顧問 元常務執行役員	平成 25 年 11 月～(継続)
永妻 忠夫	大阪大学 大学院基礎工学研究科	教授	平成 23 年 2 月～(継続)
萩行 正憲	大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター	副センター長 教授	平成 23 年 2 月 ～平成 26 年 10 月
深澤 亮一	(有) スペクトルデザイン	代表取締役	平成 23 年 2 月～(継続)
寶迫 巖	国立研究開発法人 情報通信研究機構 未来 ICT 研究所	所長	平成 25 年 10 月～(継続)
安岡 義純	防衛大学校	名誉教授	平成 23 年 2 月～(継続)

本技術テーマでは、テラヘルツ波の基礎的な研究開発の成果を、理工学、医薬、農学などの基礎研究や、より広範な産業分野への応用展開に向け革新的な基盤技術を生み出すことを狙いとしている。この観点から、アドバイザーは産業界と学术界からバランスよく人選し、登用した。特にスタート時においては提案課題の採択について P0 の審査を補佐する職責を考慮し、テラヘルツ波の応用分野の多様性に対応できるようアドバイザーの専門性の多様性についても配慮した。

学术界からは、テラヘルツ全般の学理に関わるアドバイスを期待し、テラヘルツ波デバイス、及びその応用分野の著名な研究者を登用した。

また、産業界からは、医薬、バイオ、化学などへの応用展開の活性化を期待し、デバイス、測定機器のみならず医薬分野、化学分析の専門家もプログラムの進展に伴い途中からも登用し、業界の情報提供や指導、紹介を幅広く行えるよう配慮している。

## 7. 技術テーマのマネジメントについて

### (1) 運営方針および進捗状況把握について

本プログラムの特色は産学連携を特定の企業とのみ行うのではなく、広く業界企業研究者などからの意見を研究者が聴取する「共創の場」を通じて直接聞きながら、自らの提案課題を推進する点にある。そのために、アドバイザーの半数は企業での経験が豊富な方々にお願いしている。従って研究者と企業関係者の交流はもっとも重要な点である。

また、各課題間での協力や補完は新たな研究に繋がる可能性も大きく、このようなプロジェクトでは大切にしている点である。P0 と共にアドバイザーの専門知識を活かして積極的に動いてもらうよう行っている。研究者間の情報共有と全体的な進捗のチェックは、年に1-2回行う全体会議を活用する。また、アドバイザーと共に訪問するサイトビジットを通じ、課題個々の研究実施状況の現場把握と討論を行って、個別の問題に対処している。

本技術テーマの他のテーマと異なる点は、テラヘルツ波業界自体が未だ確立されていない点である。発足時に推薦母体に参加していない業界からの意見も必要に応じて十分聞くことができるように、新課題の参入や研究の展開に応じて、適切なアドバイザーの追加や、共創の場への企業からの参加を促している。採択テーマ数を許される限り多くし、リスクの高い新規開発研究に対して、有効性を高めるように努めている。その結果場合によっては研究費の若干の減少を研究者にはお願いせざるを得ないが、若い研究者にチャンスを与えることは大切である。

研究の進展に伴い、研究成果としてプロトタイプのデバイスや計測装置が立ち上がってきている。これらを研究組織内部での評価に留めず、他の研究者や産業界にも利用してもらい、その評価を研究にフィードバックすることは大変重要である。このための「テラヘルツ テクノロジー プラットフォーム(TTP)」を立ち上げ、いくつかのデバイスについては研究者間および企業の研究者に配布し利用してもらい、その結果をフィードバックできる仕組みを立ち上げている。次ページ添付の表は、本プロジェクトで開発したデバイスや計測システムの TTP 登録状況を示す。研究終了者の協力もいただいている。

一方光産業の新技术立上げを多く見聞し、日本の光産業にも詳しいシリコンバレーの光産業コンサルタントに、代表的なテラヘルツ国際会議に参加してもらい、発表や主要な研究者のインタビュー、企業展示などから、テラヘルツ波の産業展開について調査を依頼した。国際的視点から、また THz 研究に従事している研究者とは異なった立場での意見は、プロジェクト推進に有益であると考え、2014年、2015年と2回にわたって実行した。わが国の中からは気付きにくいような指摘もあり、その報告書を研究者や企業研究者に提供した。報告書で指摘している主なところを纏めると以下の様であった。

### 2013 report での指摘

#### 38<sup>th</sup> International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Wave (IRMMW-THz2013)

THz 技術の未来レポート (MIT, Argonne NL, 他) はいずれも魅力的で重要な展開が期待されるとしているが、現在の市場は小さい。重要なことは、どうして THz なのか? が明確にされていない。また、



応用シナリオでその実用性が限定的。すなわち実験室条件での純粋材料の検出でさえ感度が低かったり、計測時間が長いなどの問題が多い。計測装置は堅牢で、サイズ、重量、電力消費が十分実用的なことが必要である。言い換えればどうして THz なのか（新技術で何ができるか、既存技術よりどうして優れているかの明確化）、どのような利用シナリオが描けるかを明らかにすることである。

THz 研究の進め方として、THz を使うことが best らしい応用か、上記問に明確で説得力のある答えができるか、少なくとも先行技術に対してこの答えが出せることがを指摘している。

## 2015 report での指摘

### Optical Terahertz Science and Technology 2015 (OTST 2015)

基本的な問題点は前回と同じであるが、会議自体がより学術的色彩があった。この報告書では、コンサルタントの視点からの THz 技術への提案が述べられていた。

THz により現在より良い方法が得られそうなものには

i) 半導体や絶縁物の電子状態や状態遷移のプロープ ポンプ-プローブ法などの利用。高分解能で半藤他の欠陥検査や、高分子材料に適用。

ii) 生体関連分子のオリエンテーションや水和などのプロープ。THz エネルギーがこのような分子の特徴と一致

iii) 超高速データ通信

iv) 微小部に超高電磁界を印加 (>10MV/cm) 可能性。他の周波数域と異なり、THz 放射は集光などにより大変強い場を生じることができる。これにより材料の改質、例えば電磁スピンの回転などができる。

700GHz をこえるスイッチスピードの FET が発表されており、optical THz と electrical THz が一体化しつつある。このことをさらに考えると、シリコン THz photonics や 3D アンテナ設計、材料開発は、光にとってもエレクトロニクスにとっても現実的で実り多いテーマになりうるのではないだろうか。

## テラヘルツ・テクノロジー・プラットフォーム (TTP) 登録機器、デバイス

No.	提案名称	提案者	
		氏名	所属
1	共鳴トンネルダイオード・テラヘルツ発振器	浅田 雅洋	東京工業大学 大学院 総合理工学研究科
2	テラヘルツ・シンセサイザー	安井 武史	徳島大学 大学院ソシオテクノ サイエンス研究部
3	デュアル THz コム分光装置	安井 武史	徳島大学 大学院ソシオテクノ サイエンス研究部
4	テラヘルツ・コム参照型周波数カウンター	安井 武史	徳島大学 大学院ソシオテクノ サイエンス研究部
5	高強度テラヘルツ波の産業応用探索プラットフォーム (テラヘルツ顕微鏡・照射実験系および細胞培養等バイオ研究設備)	小川 雄一 田中 耕一郎	京都大学
6	テラヘルツ波ケミカル顕微鏡	紀和 利彦	岡山大学 大学院自然科学研究科
7	テラヘルツ・エバネッセント波を利用した液体分光装置	水津 光司	千葉工業大学
8	テラヘルツ検出器の感度・NEP の較正	廣本 宣久	静岡大学
9	高輝度・波長可変テラヘルツ光源のサイト利用	川瀬 晃道 南出 泰亜	名古屋大学 大学院 (独) 理化学研究所
10	分子性結晶のテラヘルツスペクトルの精密量子化学計算	富永 圭介	神戸大学 分子フォトサイエンス 研究センター
11	広帯域複素誘電率測定	富永 圭介	神戸大学 分子フォトサイエンス 研究センター
12	液体窒素デューワー付 THz-QCL 光源	平山 秀樹	(独) 理化学研究所
13	可搬型・超高感度テラヘルツ波検出装置	南出 泰亜	(独) 理化学研究所

## (2) 技術テーマの見直し および研究継続の評価基準

2010年の発足時に12件を採用した。当初研究期間3年とした申請は2件のみで、他はすべて5年を希望していた。希望通りに研究期間を設定すると、研究メンバーの入れ替わりは少なく、10年のプログラムとして外部から見て固定した研究グループとみられ、活性度が阻害される。それ以上に、研究テーマによって適切な研究期間があることから、2年目での中間評価時にそれまでの研究の進捗と今後の展開を推し量り、3つの研究期間に課題を振り分ける作業を行った。すなわち、3年、4年、5年の期間に各4研究課題とし、評価理由を丁寧に説明し、了解を得た。中には学術的な点を含めて評価がSであるが、共創のテーマとしては4年で終了してもらい、より適した外部予算の取得を目指す方が良いとしたものもあった。

評価のガイドラインは

1. 共創の趣旨に沿ったテーマ推進で、予定の成果が期限内に見込めるか、より学術的な推進を望むのであれば、早目の科研費等他への応募が本人の為にも望ましい。
2. 研究成果がある程度得られ展開研究に入るのであれば、共創の枠の卒業を早める
3. 標準の確立など、より適した省庁の予算が必要な場合

である。

技術テーマの見直しは1件行った。実質的な成果が研究協力者のものが中心であったことから改善を求めた結果、研究代表者が代表者を辞退した。研究協力者の研究は評価されていたので、代表者を交代して課題は継承させ、研究を終了した。

## (3) 「産学共創の場」の推進と活用

「産学共創の場」は、研究者が立場の異なる複数の企業の方々からの意見が聞ける重要な場である。この場は技術テーマ提案者の出席が基本であるが、産業構造が未成熟な分野であることから、より広い産業分野からの参画を得られるよう日本学術振興会産学協力研究委員会「テラヘルツ波科学技術と産業開拓第182委員会」の産業界委員にも声掛けし、出席をいただいている。

より深まった議論が可能になるように、1泊2日での会を主宰している。これは、会議の公の場での議論とともに、その場ではできないような産業界との問題についても十分なコンタクトの場を持つるようになるためである。同時に研究者間のより親密な情報交換に大変役立っている。

この場での情報をもとに共同研究や技術の移転に繋がったものも多数出てきている。

## (4) 技術テーマ運営の上の研究費配分について

研究の遂行がスムーズに行くよう、初期の装置導入などに対し、出来る範囲での融通を予算内で図った。また、活動の評価により支援金額に差異を与えて支援した。特に追加配分についてはアドバイザーの評価も斟酌し、重点配分を行った。

テーマ全体の特徴ある運営のために、P0預かりの枠を設けた年もある。これは、前述のTTPのためのデバイスなどの試作経費の補助であり、製作したデバイスを共創の研究者に留まらず、企業の研究者にも試用してもらい意見をもらえるようにした。また国際コンサルタントに委託し、重要な国際会議に出席してその会議での発表内容や主要な研究者や出展している企業技術者へのインタビューを通して、テラヘルツ技術の展望についてのレポート費用に充てた。

## (5) 今後の取り組み

テラヘルツ産業界からは、産業規模が現状では極めて小さく基礎的な研究はやりたくてもできないことから、(1) 技術の展開に必要な基礎への期待、(2) 光源・検出器など産業的にも利用出来る基本デバイス開発、(3) 新たな展開に繋がる新技術の可能性の実証、などのテーマが寄せられた。平成22年度採択後、平成26年度、平成27年度と追公募を行い、多くの新規な提案が寄せられ、慎重なる審査を経て採択してきた。平成27年度に終了する課題に替えて平成28年度にも追公募を行い、プロジェクトの一層の推進を図る予定である。

## 8. 技術テーマとしての産業競争力強化につながる技術の確立に向けた状況

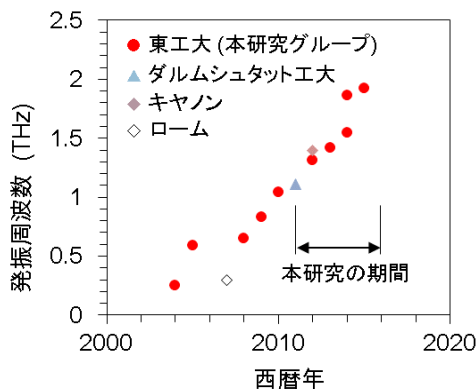
### (1) 課題評価の結果を踏まえた技術テーマの設定目標に対する達成状況

平成 22 年度に採択した課題は、研究期間は異なるものもあるが全課題の研究が本年度末で終了する。一方平成 26 年度、27 年度採択課題は現在研究に着手して日が浅いことから、ここでは前者の課題の状況を中心に述べる。

#### 高性能テラヘルツ光源及びテラヘルツ検出

光源については、電子デバイス側からのアプローチとして、共鳴トンネルダイオード (RTD) と、フォトンクス側から量子カスケードレーザ (QCL) および非線形フォトンクステラヘルツ発生がとりあげられている。

RTD (東京工業大学 浅田 5 年) の目標は、1. 高周波数化、2. 高出力化、3. 優れた放射特性を持つ発振素子開発、4. 発振スペクトルと雑音特性の把握・狭線化と安定化、5. 変調特性 を上げている。5 年間の研究期間で着実な進展をみせ、発振周波数 1.92THz に達した。この値は電子デバイスの直接発振の現状で世界最高周波数である。半導体プロセスおよび装置組込みをそれぞれ協力する外部企業に委託し、本来の研究開発に注力できるようにマネージし、成果を挙げた。製作した発振キットを使って自らの研究を進めると共に、「TTP」を介して他機関に供与し、そのフィードバックを得ている。出力はまだ数マイクロワット程度であるが、研究レベルでは数十から百マイクロワット程度を実現している。アレイ化技術も含めて、テラヘルツ帯で数百マイクロワット、サブテラヘルツ帯でミリワット出力が見えており、通信への展開も含めて新たな応用展開を提案し、一部達成した。関心を持つ企業も多く、次への確かな段階に踏み出せる成果が得られた。



RTD の発振周波数の進展。本研究開始後の進展が大きい



試作提供している電源を含む発振器

by 浅田

QCL (理研 平山 5 年) は GaAs/AlGaAs QCL の動作温度の高温化と低閾値化を、Al 組成を高めること、および量子構造を 3 準位系から 4 準位系にすることで実現と、GaN/AlGaN 系での QCL 実現により、GaAs 系や InP 系では実現できない未開拓波長を開拓 を目標として研究を行った。

前者では Al 組成を高くして LO フォノン散乱エネルギーの増加により、高温、低閾値動作を実現し、動作温度の高温化により液体窒素温度での動作は実現したが、出力レベルが低く、プロセスの安定性・再現性に問題を残した。一方これまでの QCL では発生できなかった 5THz 以上の波長帯での発振を GaN を用いて世界で初めて実現した。その成果は学術的にも高く、研究者グループの窒化物材料の豊富な経験によるところが大きい。しかし産業界へ展開を図るレベルに到達したとは言い難く、今後の一層の努力を期待したいテーマである。

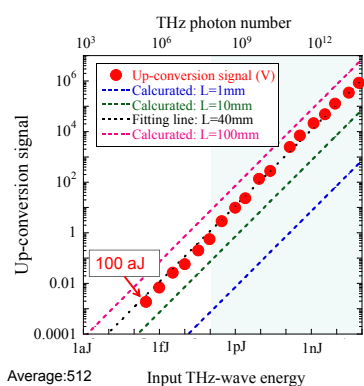
非線形フォトンクステラヘルツ発生 (名大 川瀬、理研 南出 5 年) の目標は、1. 非線形光導波路による高効率広帯域テラヘルツ光源、2. 波長可変光源を用いた実用性の高いテラヘルツ分光システム、3. 光注入型パラメトリック発生によるテラヘルツ増幅、4. 室温動作で超高感度テラヘルツ検出 (等価雑音パワー  $10 \text{ pW/Hz}^{1/2}$ )、5. リアルタイム 2 次元超高感度テラヘルツ検出、である。グループが展開してきた外部注入同期テラヘルツパラメトリック発生の出力増大の問題を根本から見直し、ブリルアン散乱にエネルギーが散逸していることを突き止めた。この対策としてサブナノ秒での励

起を行い、出力を5桁以上高めることに成功した。その結果被測定物への透過能が飛躍的に高まることを示すなど数多くの成果を挙げている。目標の達成率は100%を越え、その活動は国際的にも高く評価されている。また、成果に基づき産業界との共同研究や委託研究を活発に進めている。

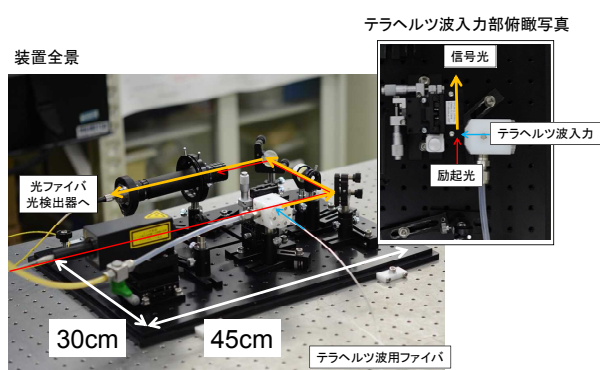
検出に関する課題は、常温動作のボロメーター、および前述の非線形アップコンバージョンによる研究がある。

常温動作ボロメーター（静岡大学 廣本 3年）では 1. アンテナ結合ボロメーターTHz 検出器で従来のものより1桁検出能を改善、2. 5年後に2次元アレイ検出器を実現 を目標とした。MEMS構造を用いた独自の設計により、産業的に最も必要とされる1THz帯での最高感度を目指した。素子プロセスの遅れと、この分野の研究の世界的な立ち上がりと考え、共創の研究としては3年で終了した。協力企業と継続して研究を継続している。

非線形アップコンバージョンによる高感度検出（理研 南出 5年）の目標は、前出の 4. 室温動作で超高感度テラヘルツ検出（等価雑音パワー $10\text{ pW/Hz}^{1/2}$ ）、5. リアルタイム2次元高感度テラヘルツ検出、である。検出は非線形フォトンテラヘルツ発生過程の逆過程を利用するもので、室温動作と共に高速応答の特徴を持つ。非線形材料として、 $\text{LiNbO}_3$  および DAST を使い、どちらでも極低温シリコンボロメーター以上の検出感度性能を室温で実現。透過雑音パワーは約  $100\text{ fW/Hz}^{1/2}$  と目標より2ケタ程度良い結果を達成している。またリアルタイムテラヘルツ波イメージングを、市販のIRカメラで実現している。これは光学系の工夫とテラヘルツ波強度の増大によるもので、光ファイバーを用いたプロトタイプを作り上げるなど、今後の展開が楽しみである。



入力テラヘルツ波エネルギーと  
出力近赤外信号光の関係



光ファイバー技術を用いた  
小型・高感度テラヘルツ波検出装置

by 川瀬・南出

## テラヘルツスペクトル情報の解明

「テラヘルツスペクトルは分子について何が分かるか」はテラヘルツ波の応用において基本的な重要な問題であり、産業界からの要望も大きい。

テラヘルツスペクトル理解のため、テラヘルツ帯のみならずその前後の波長帯の計測装置を立ち上げ、全スペクトル帯を統一的に測定できるようにし、分子科学の学理を追及するというものである（神戸大学 富永 5年）。その結果、テラヘルツ帯のスペクトル解析では、並進の分子間振動、ライブラーシオン、分子内振動に分割し、同定するという技術的方法論を確立した点は、応用分野で現象理解、計測手法開発の方向性に指針を与えるものである。幅広い分野の研究者や産業界とのネットワークを特に後半で構築し、製薬で重要な結晶多形への応用等、今後の産業競争力強化への貢献に期待できる成果を挙げた。

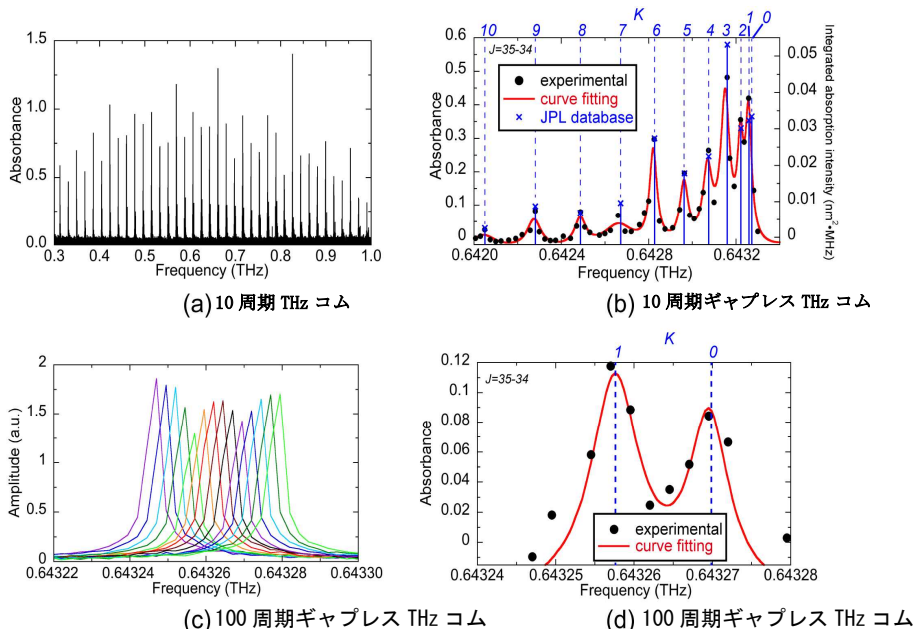
テラヘルツ波による高分子構造の解明と評価（理研 保科 3年）では、1. ポリマー、ゲル、セルロースなどのX線やNMRでは従来測定が困難であった高分子の詳細な高次構造やダイナミクスの解明、2. 高強度テラヘルツ波による構造的・機能的変化の制御を目標とした。実験と計算を丁寧に行

うことで、スペクトルの帰属を明らかにした。特に高分子のテラヘルツスペクトル解析法として限られた領域に DFT 計算を行う分子断片化法が有効なことを示した。高分子の制御については、ゾル-ゲル遷移に対して水素結合の変化が確認された。ゲルの超分子構造はテラヘルツでなければ観測できず、今後、産業的に影響力が大きな高分子工業での応用が期待される。

### テラヘルツ計測法及びそのデバイス開発

新たな計測法の提案には、テラヘルツ波帯の周波数標準技術、および複素誘電率分光計測がある。電波や光波領域と同等の不確かさを有するテラヘルツ周波数標準技術確立の研究（徳島大学 安井 4年）で、電波・光波・テラヘルツ波を周波数コムでコヒーレントにリンクすることにより、国家標準にトレーサブルなテラヘルツのコム走査型分光器、シンセサイザー、スペクトラムアナライザーを確立する技術である。分光器ではスペクトル分解能 3MHz、スペクトル確度  $10^{-7}$  以下、スペクトル帯域 57THz を達成。産学共創の場で企業から要請があり、共同開発に至った。周波数標準は総務省が担当でもあることから、S 評価ながら研究機関を 1年短縮して、次の活動を開始してもらったテーマである。

#### 低圧アセトニトリル (CH<sub>3</sub>CN) の分光計測



帯域1THz、分解能2.5MHz、確度 $10^{-7}$ の両立 by 安井

テラヘルツ帯での複素誘電率計測法（千葉工業大学 水津 4年）は、非線形光学効果で発生したテラヘルツ波を外部に取り出さず、エバネッセント波と物質との相互作用で物性情報を得るものである。テラヘルツ波が受ける相互作用の情報を、近赤外域の光波で読み出すもので、テラヘルツ波を直接検出する必要がない特徴を持つ。研究期間中には今一步再現性のあるデータの取得に難があったが、産業に繋がる課題の抽出もできて今後の展開を期待している。継続研究を行っており、テラヘルツを直接検出せずにテラヘルツ情報を得る新規方法として期待される。

レーザーテラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM) の提案・開発・応用試行を進めてきたグループからは、LTEM の機能拡張が産業展開には欠かせないとして、新たにケミカルチップを開発し、イムノアッセイや生化学反応の可視化、細胞イオン活動計測など目指した（岡山大学 紀和 年）。ケミカルチップの計測用 LTEM を試作後、イオン計測に集中することで抗原抗体計測や低分子計測の共同研究を実施するなど成果を挙げ、研究終了後も企業との共同研究が続いている。

## テラヘルツ波の新分野応用

テラヘルツ波との相互作用が顕著な有機物やアモルファス材料、さらに生体材料についての新たな展開を目指した研究が行われた。

有機物やアモルファス薄膜が重要な働きをする次世代エレクトロニクスで、薄膜のキャリア輸送特性を非破壊で定量評価する技術（理研 山下 3 年）開発は重要である。テラヘルツ帯でのエリブソメトリを構築し、導電性高分子の輸送特性の評価ができることを示し、今後産業分野で使われる可能性を示したことは評価できる。

細胞の機能・動態をより生体に近い状態で把握することは重要であり、テラヘルツ波を利用したセンサー・顕微鏡・ユニットの開発が行われた（京都大学 小川 4 年）。特に細胞内の水の分析により、細胞の活性度評価結びつける研究を行った。酸化ストレス反応のモニタリングなど、今までに観測されていない計測は産業界の関心も大きく、今後実験データを積み上げて、テラヘルツ波が細胞内の水素ネットワークの評価に最も適した手段であることの実証に繋げてほしいと考えている。

高強度テラヘルツ波により、生体分子系の現象生成や制御を能動的に行う研究（大阪大学 永井 3 年）が進められた。本テーマでは、高強度テラヘルツ波光源の開発から始まり、出力の物質などへの結合、さらに物質への効果のデモンストレーションを進めるといものである。「代替技術の無い高い付加価値を持つテラヘルツ波光源のニーズ」の創出にまでは至っていないが、進むべき方向や達成すべき性能目標は明らかになってきており、さらなる展開を期待している。

### (2) 産業競争力強化につながる技術の確立に資する成果

産学共創の研究課題は、各自がそれぞれ産業の創出につながるように考えての提案であるが、どうしても多くはこれまでの学での研究の視点からである。その成果を産業側から目を向けてもらえるレベルにするための有効なアドバイスを、PO やアドバイザー、共創の場での産業界の人たちから受けることにより、新たな展開が図られるようになる場面は数多い。共通の指摘で多い点は、テラヘルツ技術で初めて見え、測れたのではなく、先行技術や他の方法がないのか。あればそれらとの厳しい比較検討を行い、どのような長所と短所があるのかを明確にすることが不足しがちである。このことは国内の研究に留まらず、米国のコンサルタントも同様であり、強く指摘された点である。産業競争力強化につながる技術の確立のため、重要な点である。

技術のブレークスルーとして上述の成果からあげるとすると、

- ・ 発振周波数 1.92THz に達した共鳴トンネルダイオード RTD。5 年間の研究期間で着実な進展をみせた。
- ・ 非線形フォトリクステラヘルツ発生。非線形光導波路による高効率広帯域テラヘルツ光源、および光注入型パラメトリック発生の高出力化でブレークスルーである。また、室温動作で超高感度テラヘルツ検出（等価雑音パワー $10\text{ pW/Hz}^{1/2}$ ）やリアルタイム 2 次元高感度テラヘルツ検出も今後小型化やファイバタイプへの展開が期待される。
- ・ 産業の基盤になるテラヘルツ帯のスペクトル解析では、並進の分子間振動、ライブラレーション、分子内振動に分割し、同定するという技術的方法論を確立した。今後幅広い応用分野で現象理解、計測手法開発の方向性に指針を与えるものである。
- ・ 国家標準にトレーサブルなテラヘルツ周波数標準の利用は、国家の基礎技術であり、産業基盤としては大変重要であるが産業創出とは若干異なる。しかしこの技術では世界をリードしており、今後総務省や産総研などとの研究展開にバトンを渡したものである。

### (3) 最終目標達成（産業界で共通する技術的課題「技術テーマ」の解決に資する成果創出）の可能性

RTDをはじめとする光源・検出器の優れたデバイス開発は、新分野を開拓しようとする研究者をはじめ多くの産業界での展開に結びつく。H25、H26 年度で採用した開発テーマには、半導体や MEMS などを駆使し、光源も検出器も室温で動作するものが複数含まれている。これまでの成果の上に産業界で是非利用したいと言われるようなデバイスに展開できるように、研究を支えて行けるように動いている。

#### (4) 懸案事項・問題点

わが国の産業界の新規産業への参画意欲は残念ながらあまり強くない。まだ産業としての基盤が立ち上がっていないテラヘルツ技術に関して、はじめから大きなマーケットを持つようなターゲット（キラアアプリケーション）は極めて少なく、地道な活動が不可欠である。産学共創の成果を利用する企業の意欲をどのように誘発するかもこの事業の重要な点である。学会活動や各種シンポジウムなどで、成果を広報して行く。

### 9. 総合所見

#### ・技術テーマとしての産業競争力強化につながる技術の確立に向けた状況（課題評価等も総合して）

テラヘルツ波計測装置や分光装置を製品としている会社は世界でも10数社程度と極めて少ないが、コンポーネントや部品を製造販売する会社は急激に増えてきている。そのような環境で、産学共創の成果を現在すぐに産業に移転し、生産に繋がるものを求めることは容易ではないが、その流れは少しずつ現れ始めている。我々としては、目に見える成果とともに近い将来に大きな変革をもたらすような成果を、基礎の学術成果からきちんと橋渡しができる形に仕上げるように努めている。光源関連の研究成果はその例である。RTDは出力こそ小さいが電池電源だけで簡単に動作するその容易さと、高速変調性や同一構造素子を検出器にも使えるフレキシビリティは突出した性能を有していることを初めて世界に示したものである。生体計測などの診断応用に適した計測チップなどへの展開も模索されており、今後の展開につながるものと思う。

非線形フォトンクスによる発生検出は、やはりその高出力性や高感度特性を本プロジェクトで明らかにされてから動きが出てきている。開発した広帯域・高出力を発生する一部のLiNbO<sub>3</sub>デバイスは実際の製品に搭載されている。また、郵便物内の危険物検出などでは、実環境でもS/N良く検出できるようになっており、これからのいろいろなシーンに展開してゆく可能性が見え始めている。

テラヘルツを使ってどのようなものを見るかが決まると、そのための最適波長が決まり、半導体のQCLのような光源開発は一気に進むことであろう。このための応用展開の研究は大変重要である。物質のテラヘルツスペクトルの根拠の指針が示されたことも産業競争力強化につながる重要な成果である。

#### ・技術テーマのマネジメントについて（課題選考、技術テーマ運営）

課題選考時には提案内容が共創の目的に合致した成果に繋がるかを主に審査してきているので、分野配分には特に配慮しているわけではないが、結果として分野バランスは取れている。

テラヘルツ波の展開では、医薬、農学などのバイオ系や高分子との相互作用などが期待でき、提案も活発であることから、この分野を熟知したアドバイザーを追加し、強化している。アドバイザーを通じ産業展開を考えている企業分野の専門家の紹介や、共創の場への参加案内により、新規分野のテーマ運営がスムーズに進むよう配慮して行っている。

#### ・「産学共創の場」の意義、今後の活用方針

「産学共創の場」は研究者からも大変有意義であるとの意見を多く聞く。新たな展開をはかるためには、場の参加者にも新たな分野からの参加も必須である。医薬、農学などのバイオ系産業や高分子産業などは、技術テーマの提案団体にはもともとほとんど所属していなかった。アドバイザーのネットワークを通じて参加者を増やしてきているがまだ十分ではない。一方研究者には展開を期待している他分野の学会で積極的に発表を行い、バイオ系や高分子系のコミュニティに関心を持ってもらうことが必要であることを伝え、実行してきている。

#### ・本技術テーマを設定したことの意義（研究開始以前と終了時点との比較を念頭にして）

産学共創はアーリーステージの課題遂行に大変適した制度であると、これまで推進して来てその念を強くしている。当初最初の公募に参加しなかったり採用されなかった人たちから、このプ

プロジェクトは再募集をするのかということは何度か聞かれた。その後 H26、H27 と公募していることは研究者たちの強い励みになっており、より産学共創に合致した研究提案を目指す機運が高まっている。これに伴い、独自の新しい展開を目指した研究が活発化していることは特筆される。

本プログラムのスタートとほぼ同時期に、フラウンホーファー機構にテラヘルツ研究所がカイザーブラウテルンに設立され活動している。2015年10月に現地を訪ねた。セキュリティへの応用機器の開発など、研究開発内容は大変具体的である。実際にもものづくりを目指すフラウンホーファーと提案研究を進める産学共創では産業化への道筋は違うが、テラヘルツ研究の幅広さでは産学共創の方がはるかに広い。この点を活かした新たな産業展開へと結び付けられるように一層努力したい。

#### ・ 今後への期待や展望

上述した研究を終了したテーマのこれからの展開に期待したい。実際これまでテラヘルツとはあまり関わりのなかった企業がかなり本気に参入しようと優秀な研究員を派遣する動きなどが、活発化している。海外に比してその活動のレベルは高い我が国のこの分野をさらに高めるためにも、新たな展開が複数打ち出せるように進めて行く。

H28年度以降継続している研究課題は9件であり、H27年度終了課題の公募をH28年度の早い時期に行う予定である。わが国が得意とするデバイス開発のテーマや、高分子に関連したテーマが現在複数個走っており、それらの成果が確実に出て行くようにしっかりと見守りたい。

#### ・ 感想、その他

1970年代の半導体レーザーの開発では、学のリードの下、複数の産が互いに知恵を絞りながら開発を続け、世界を制する成果を出していった。この産学共創の仕組みは、アーリーステージの研究開発に適したものであり、光通信の開発時のように複数の産が取り組んでいただいている。異なることは産が大変広い分野に跨ることである。そのため、コーディネータの果たす役割は大変大きい。

以 上