

**研究成果展開事業
産学共創基礎基盤研究プログラム**

**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」**

技術テーマ事後評価用資料

令和2年5月

目 次

1. 技術テーマ	3
2. プログラムオフィサー (P0)	3
3. 採択課題	4
4. 技術テーマのねらい (目標)	6
(1) 技術課題解決に向けた考え方	6
(2) P0 の目標	7
(3) 「産学共創の場」の活用方針	7
(1) 選考の方針	9
(2) 採択課題の構成	9
6. アドバイザーの構成について	12
(1) 人選にあたっての考え方	12
7. 技術テーマのマネジメントについて	13
(1) P0 の運営方針	13
(2) 技術テーマの進捗状況の把握	13
(3) 技術テーマの研究計画の見直しの有無、概要	13
(4) 研究課題の評価と指導	14
(5) 課題中間評価における評価基準 (研究計画の見直し、研究中止、研究継続の根拠)	14
(6) 研究費の配分	15
(7) 「産学共創の場」の推進と活用	15
(8) アウトリーチ活動	15
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状況	17
(1) 課題評価結果を踏まえた最終目標の達成状況	17
(2) 産業競争力強化につながる技術の確立に資する成果	18
(3) 個別の産学共同研究への発展状況	26
(4) 技術テーマとしての成果を産業化に繋げるための方策・課題等	26
(5) 今後のプログラム運営への提言	28
9. 技術テーマ中間評価時の指摘事項に対する対応状況	29
10. 総合所見	30

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力を活かし、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波科学・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っ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

本技術テーマにおいては、平成 22 年度に 12 課題、平成 26 年度に 4 課題、平成 27 年度に 5 課題、平成 28 年度に 3 課題を採択した。平成 26、平成 27 及び 28 年度の採択は、先行の課題の終了に伴い、技術テーマの目的を達成するために新たな課題を採択したものである。

表 1 採択課題

採択年度	終了年度	課題番号 末尾 2 桁 (項番)	研究代表者 (所属 役職)	研究課題名
H22	H27	01	浅田 雅洋 (東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 教授)	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
H22	H26	02	小川 雄一 (京都大学 農学研究科 准教授)	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
H22	H27	03	川瀬 晃道 (名古屋大学 工学研究科 教授)	先端非線形フォトンクス・テラヘルツ発生/検出技術の開発
H22	H26	04	水津 光司 (千葉工業大学 工学部 教授)	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
H22	H26	05	紀和 利彦 (岡山大学 ヘルスシステム統合科学研究科 准教授)	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
H22	H27	06	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)	凝縮相テラヘルツ分子科学の深化
H22	H25	07	永井 正也 (大阪大学 基礎工学研究科 准教授)	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
H22	H27	08	平山 秀樹 (理化学研究所 量子工学研究センター テラヘルツ量子素子研究チーム チームリーダー)	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
H22	H25	09	廣本 宣久 (静岡大学 創造科学技術大学院 電子工学研究所 教授)	1 THz 帯高検出能常温検出器技術の研究
H22	H25	10	保科 宏道 (理化学研究所 量子工学研究センター 上級研究員)	テラヘルツ分光による高分子構造の解明と操作
H22	H26	11	安井 武史 (徳島大学 ポストLED フォトニクス研究所 所長/教授)	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
H22	H25	12	山下 将嗣 (理化学研究所 量子工学研究センター 上級研究員)	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

H26	H30	13	渡邊 紳一（慶應義塾大学 理工学部 教授）	高速・高精度テラヘルツ時間領域ポーラリメータの開発と産業応用展開
H26	H29	14	河野 行雄（東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 准教授）	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
H26	R1	15	伊藤 弘（北里大学 一般教育部 教授）	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
H26	H28	16	佐藤 春実（神戸大学 人間発達環境学研究科 教授）	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
H27	R1	17	平川 一彦（東京大学 生産技術研究所 教授）	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
H27	R1	18	加藤 和利（九州大学 システム情報科学研究院 教授）	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
H27	H29	19	永井 正也（大阪大学 基礎工学研究科 准教授）	テラヘルツレーザー脱離イオン化法の開拓
H27	H29	20	谷 正彦（福井大学 遠赤外領域開発研究センター 教授）	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
H27	R1	21	梶原 優介（東京大学 生産技術研究所 准教授）	エバネッセント波のナノスコピーによる新規物質計測法の開拓
H28	R1	22	大道 英二（神戸大学 理学研究科 准教授）	テラヘルツ電子スピン共鳴イメージング法の開発
H28	H29	23	小川 雄一（京都大学 農学研究科 准教授）	細胞計測を目的としたテラヘルツ近接アレイセンサの開発
H28	H30	24	坪内 雅明（量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所 上席研究員）	高速テラヘルツカラーイメージング装置の開発

4. 技術テーマのねらい（目標）

（1）技術課題解決に向けた考え方

テラヘルツ波は光波と電波の狭間にあることから、基本となるその発生・検出の技術も光波のフォトンクスおよび電波のエレクトロニクスの両サイドから進められきた。この狭間の帯域は双方のデバイス効率が本質的に低下する厄介な領域であり、長い間本格的な開発の手が付けられていない状態であった。そのため、学術活動自体ほとんどこの30年余で立ち上がってきた新しい分野である。近年のテラヘルツ波技術の発展と展開には目覚ましいものがあり、計測装置、発生装置などの研究開発用のものから、一部産業応用への試みに向けて着実な進展が続いている。このような中で、学術活動分野をはじめ我が国の貢献は顕著であり、活発な研究が成されており、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。「産学共創基礎基盤研究プログラム」に用意された産業界と研究者との対話の場「産学共創の場」を積極的に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きた。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つような研究課題と開発研究を、アドバイザーの協力・指導のもと、共創の場やサイトビジットなどを通じ、実施して成果を上げるように努めた。取り上げた技術課題分野は次の4つである。

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た。一方、量子カスケードレーザー（QCL）や共鳴トンネルダイオード（RTD）に代表される多くの半導体デバイスや、非線形光パラメトリック波長変換デバイスは、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である。TDSは計測装置など広い情報を解析する目的には優れているが、産業応用などでは情報が過多になりやすい。必要な情報をいかに早く処理してシステム化するかは大切であり、価格的にも限られたスペクトルでの対応がもとめられることが多い。

またテラヘルツ波の検出も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、高感度、高速、そして室温で動作できる検出器は必須である。

テラヘルツ波の発生と検出は、その両者が相まって新たな計測や産業への展開が可能となる。冷却を必要としない小型のテラヘルツ波デバイスは、特に産業応用に重要である。このため、プロジェクトとしてはテラヘルツ波の利用を広く展開するうえで、新たな発想による高性能・広帯域な室温動作の光源及び検出器の展開と、光源出力の高強度化の実現が重要であり、注力した。

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. テラヘルツ波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の提案と実現は、多くの応用展開にとって重要である。また、そのためのデバイス開発は展開に欠かせない。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、光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を導く。

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、学理的な根拠に基づく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、斬新な研究課題の掘り起こしとその推進に努めた。

(2) P0 の目標

学理に基づく研究成果の中から、イノベーションに結びつくような展開が近年強く求められている。1965 年頃から米国の東海岸、そして西海岸から起こったこの動きは、ヨーロッパに、そしてアジアにも広まって、すでに半世紀以上が経過したが、わが国の状況は未だ決して活発とは言えない。最近ではシステムへの展開が強く求められており、産業界にとっては不可欠な動きであるが、多くは学理に基づくものよりニーズに従うものが求められる傾向が顕著である。

先進研究の成果は数多いが、その成果を社会活動に移すことは容易ではない。1980 年から 2000 年にかけてのわが国の光通信の揺籃期から展開期における研究では、学会活動を中心に世界を変える変革を学と産・官が合同して進めた歴史を持つ。この現場を直接知る人も少なくなってきた。この場合は、通信という明確な目標を持ちながら推進していたと思うが、特に利用する分野がまだ未確定である先端基礎基盤研究では、研究の成果を世の中に使え、産業レベルに結びつけることは至難のことである。

「産学共創基礎基盤研究プログラム」はこのような反省と期待の中に生まれたプログラムであると思う。学の基礎基盤研究を、世界の動向とニーズをとらえながら展開するこのプログラムから、世界に発信できる成果をまとめ上げることを目標に掲げて、進めてきた。

(3) 「産学共創の場」の活用方針

同じ研究プログラムを遂行している研究者間で、研究遂行中に互いに研究の進捗を報告し、議論することは良く行われる。一方「産学共創の場」は、産業に繋がる新しい研究分野の展開に熱い期待を持つ産業界の研究者の参加を促し、学会などとは違った視点で産業界の研究者とプログラム研究者が直接意見交換できる場所である。この意見交換がやりやすくなるように、配慮して運営に当たった。毎回、研究者・アドバイザーの他に 10 名程度の幅広い産業界の研究者（以下外部参加者）に声掛けし、議論に加わっていただいた。

そのためにとった運営方針は以下のとおりである。

1. 研究者と外部参加者の接触がゆっくり諮れるよう、1泊2日の会とし、創造的環境が得られるように、実施場所に配慮
2. アドバイザーの協力により、幅広い産業界からの外部参加者の招待
3. 参加した外部参加者からは、企業サイドからの発言を必ず得られるよう運営
4. 秘密保持の誓約書を用意し、未公開情報の取扱いに注意

テラヘルツ波科学技術の利用可能性や新たな産業展開を期待する企業研究者に、外部参加者として参加してもらえるように配慮した。バイオ、高分子化学に関連した研究課題数は1/3以上になり、専門のアドバイザーに加わっていただくとともに、産学共創の場ではバイオ、高分子の業界の研究者との接触の場が作れるよう、プログラム後半では特に配慮した。

5. 研究課題の選考について

(1) 選考の方針

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最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、科学的、産業的意義の確立が不可欠である。募集を行った上述の4技術課題分野の研究提案について、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慎重に審査を行った。テラヘルツ波研究のような新しい研究分野では、キラーアプリケーションが見い出されていないことが多い。このため選考する研究課題に先入観を持たずに、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に繋がるような独自性あるシーズを幅広く、かつ慎重に選考してきた。

(2) 採択課題の構成

採択総課題数は24であり、表1に年度ごとの選考推移、表2には研究課題の技術分類を示す。採択課題数の分布は、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. テラヘルツ計測法及びそのデバイス開発 : 6 課題
3. 新分野応用 : 8 課題
4. テラヘルツスペクトル情報の解明 : 3 課題

基礎的なスペクトル情報解明の研究課題も取り上げながら、産業展開が図られる光源・検出器開発へと繋がるこの分布は、ほぼ望ましいものと思う。

課題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厳しく行ってきた。スタート時の22年度採択の12件の課題の中間評価(H25.2)では、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る研究課題は、この評価で申請時に計画された研究期間の短縮を行った。その結果、研究課題の追加公募によりプログラムの流動性が増すことができ、活性化を図られた。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ることができている。

表2 要素技術による採択課題の分類

要素技術	項番	研究代表者(所属 役職)	研究課題名
高性能テラヘルツ波光源およびテラヘルツ波検出	01	浅田 雅洋(東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 教授)	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
	03	川瀬 晃道(名古屋大学 工学研究科 教授)	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
	08	平山 秀樹(理化学研究所 光量	THz量子カスケードレーザ

		子工学研究センター テラヘルツ量子素子研究チーム チームリーダー)	の動作高温化と周波数拡大に関する研究
	09	廣本 宣久(静岡大学 創造科学技術大学院 電子工学研究所教授)	1 THz 帯高検出能常温検出器技術の研究
	15	伊藤 弘(北里大学 一般教育部教授)	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
	17	平川 一彦(東京大学 生産技術研究所 教授)	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
	18	加藤 和利(九州大学 システム情報科学研究院 教授)	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
テラヘルツ波計測法及びそのデバイス開発	04	水津 光司(千葉工業大学 工学部 教授)	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
	05	紀和 利彦(岡山大学 ヘルスシステム統合科学研究科 准教授)	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
	11	安井 武史(徳島大学 ポストLED フォトニクス研究所 所長/教授)	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
	13	渡邊 紳一(慶應義塾大学 理工学部 教授)	高速・高精度テラヘルツ時間領域ポーラリメータの開発と産業応用展開
	20	谷 正彦(福井大学 遠赤外領域開発研究センター 教授)	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
	24	坪内 雅明(量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所 上席研究員)	高速テラヘルツカラーイメージング装置の開発
新分野応用開拓	02	小川 雄一(京都大学 農学研究科 准教授)	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
	07	永井 正也(大阪大学 基礎工学研究科 准教授)	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
	12	山下 将嗣(理化学研究所 量子工学研究センター 上級研究員)	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
	14	河野 行雄(東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術	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

		研究所 准教授)	
	19	永井 正也(大阪大学 基礎工学 研究科 准教授)	テラヘルツレーザー脱離イオン 化法の開拓
	21	梶原 優介(東京大学 生産技術 研究所 准教授)	エバネッセント波のナノスコ ピーによる新規物質計測法の 開拓
	22	大道 英二(神戸大学 理学研究 科 准教授)	テラヘルツ電子スピン共鳴イ メージング法の開発
	23	小川 雄一(京都大学 農学研究 科 准教授)	細胞計測を目的としたテラヘ ルツ近接アレイセンサの開発
テラヘルツス ペクトル情報 の解明	06	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)	凝縮相テラヘルツ分子科学の 深化
	10	保科 宏道(理化学研究所 光量 子工学研究センター 上級研究 員)	テラヘルツ分光による高分子 構造の解明と操作
	16	佐藤 春実(神戸大学 人間発達 環境学研究科 教授)	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

6. アドバイザーの構成について

表3 アドバイザー

氏名	所属 役職	任期
上原 謙	IMRA America, Inc. Technical Advisor	平成23年2月～令和2年3月
宇佐美 隆生	物性化学研究所 代表 元 株式会社三菱化学技術研究センター 取締役	平成27年4月～令和2年3月
榎木 孝知	NTT エレクトロニクス株式会社	平成23年2月～令和2年3月
小宮山 進	東京大学 名誉教授	平成23年2月～令和2年3月
田中 耕一郎	京都大学 大学院理学研究科 教授	平成23年2月～令和2年3月
戸部 昭広	元 株式会社レナサイエンス 顧問 元 旧三菱ウェルファーマ株式会社 執行役員	平成25年11月～令和2年3月
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～令和2年3月
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 研究所長	平成25年10月～令和2年3月
安岡 義純	防衛大学校 名誉教授	平成23年2月～令和2年3月
山下 友勇	株式会社アドバンテスト 新企画商品開発室 TASグループ 担当課長	平成29年6月～令和2年3月
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
今村 元規	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	平成23年2月～平成29年3月
深澤 亮一	有限会社スペクトルデザイン 代表取締役	平成23年2月～平成29年3月

(1) 人選にあたっての考え方

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。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、テラヘルツ波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、実際にテラヘルツ波事業を行っている企業の研究責任者や経営者と、半導体、医薬、バイオ、化学企業での専門家を登用した。プログラムの進展に伴い 医薬分野、化学分析の専門家や、国立研究所のこの分野の専門官にも参加いただき、内外の幅広い情報を提供いただきながら進めることができたことは良かった。

各アドバイザーは、その専門と経験が理学、工学、薬学、化学と幅広い分野をカバーしており、有益なアドバイスを サイトビジットや産学共創の場でいただき、プログラムの運営に大きな貢献をいただいた。

7. 技術テーマのマネジメントについて

(1) POの運営方針

本プログラムの特色は、産学連携の研究を特定の企業と行うのではなく、研究者が広く業界企業研究者などからの意見を「産学共創の場」を通じて直接聞きながら、自らの研究課題を推進する点にある。また、テラヘルツ波の産業界自体が未だ確立されていない点が、他の産学連携プログラムと大きく異なる点である。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をお願いするとともに、産学共創の場には、幅広い業種の企業研究者にその都度参加いただけるよう配慮した。研究者と企業関係者の接点を広げながらの研究の推進は、本事業推進で重要視して行った点である。また、研究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、同様に大切にした。

研究者間およびアドバイザーと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「産学共創の場」を活用した。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、研究課題個々の研究実施状況の現場把握と討論を行って、個別の問題に適時対処するように努めた。アドバイザーには専門知識を活かして、研究者の相談やアドバイスを行ってもらうなど、積極的に動いてもらうよう、お願いした。新規採択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、産学共創の場への新規業界や企業からの参加を促すようにも配慮して運営した。

リスクの高い新規開発研究に対して採択課題数を許される限り多くし、技術の確立の有効性を高めるように努めた。その結果、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と考えた。

科研費による基礎研究とは異なり、研究実施期間内に提案した新しい課題の動作を確認したとか、デバイスの試作に成功したというだけでは、不十分である。研究の進展に伴い、プロトタイプのデバイスや計測装置が立ち上がってきたときに、これらを研究組織内部での評価だけに留めず、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ができるように、「テラヘルツ テクノロジー プラットフォーム(TTP)」の必要性を考え、独自に立ち上げた。研究期間を終了した研究者からも引き続いて協力を仰いでの独自の取組であったが、有効に機能させることができた。「技術テーマ中間評価」においても、高い評価をいただくことができた。

(2) 技術テーマの進捗状況の把握

アドバイザーとともに行ったサイトビジットは、9年間で延べ52回を数えた。この訪問を通じて、研究の進捗状況の把握はもとより、より有効な研究推進のために必要な提言や援助を行う重要な機会が得られた。研究方針の見直しや、問題点の解決についての議論は、この訪問時になされた。

産学共創の場では、特に産業界参加者から「こんなことに使ってみたい」という具体的な発言もあり、技術テーマの方向性を考える良い機会であった。

国内外で開かれるテラヘルツ関連の学会の数は大変増えてきた。本プログラム研究者の参加は常にあり、最新の研究内容の把握や内外の聴衆者の反響を知る機会になった。

(3) 技術テーマの研究計画の見直しの有無、概要

本技術テーマに求められる「産業競争力強化につながる技術の確立」に向けて、より有効な研究推進を目的に、サイトビジットや産学共創の場の議論を踏まえ、研究計画の見直しは

その大小に違いはあるが、ほとんどの研究課題に対して行った。限られた研究期間と人材で最大限の成果を残すには、それまでに行ってきた成果を見つつ、研究テーマの絞込や変更が必要なことがある。アドバイザーの意見も聞きつつ遂行してきたが、そのいくつかの例を述べる。

- ・ 実質的活動を分担研究者中心に行われた研究課題に改善を求めた結果、研究代表者が代表者を辞退した例。研究成果は評価されていたので、代表者が交代して研究を継続した。
- ・ 研究の進展や、産業界からのニーズに基づき、当初計画の展開研究を一部変更ないしは取り止めにして、研究の絞込を行った例。産業界が求めるしっかりとした学術的裏付けのあるデータの蓄積が不可欠であった。
- ・ 研究の進展が予定より遅れ気味な研究課題について、その原因を一緒に検討し、改善を図った。特に研究グループ内だけでは解決が難しかったり、時間がかかり計画の遂行が不十分と思われるときには、P0 から適切な指導が可能なアドバイザーにグループの相談役をお願いし、指導と相談を適宜行い易い環境を整備した。

(4) 研究課題の評価と指導

研究進行の状況確認は、複数回行うサイトビジットによって綿密に行ってきた。採択後初のサイトビジットにより、研究環境、準備状況、研究グループのテーマに対する熱意など、提案申請書などでは読み切れない情報を得ることができた。この訪問には3名以上のアドバイザーが常に同行し、それぞれの専門的見地からの助言や指導を共に行った。また、産学共創の場での企業研究者の適切な意見が、研究展開に実際に活かされているかにも配慮した。

研究の遅れや困難さが懸念される問題を抱える研究課題については、助言とともに専門的知識を持つアドバイザーをP0から依頼して、研究者が直接指導・助言を受けられるように、体制を整備した例も2例ほどあった。研究時間にまだ余裕があるときにこの体制を取ることにより、実効的な成果が得られた点は各アドバイザーに感謝している。

評価の指針として、実施している研究が「産業競争力強化につながる技術の確立」に寄与する成果を上げられればもちろん良いのだが、将来その可能性が読み取れるかということも重要視した。また研究の展開においても、将来の可能性を研究者が語れるように、出口の可能性の追求を繰り返し求めてきた。

(5) 課題中間評価における評価基準（研究計画の見直し、研究中止、研究継続の根拠）

2010年の発足時に12件の研究課題でスタートしたが、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。申請通りに研究期間を設定すると、10年のプログラムとして研究メンバーの入れ替わりは少なく、新規参入者の活性度が阻害される。それ以上に、研究課題によって適切な研究期間がある。そこで、2年目に行った第1回の中間評価では、研究内容とそれまでの進捗、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年の期間に課題を振り分け、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、本技術テーマとしては4年で研究を終了してもらい、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。

研究期間を短縮する上での評価のガイドラインは

1. 産学共創プログラムの趣旨に沿った研究のテーマ推進により、予定の成果が期限内に見込める場合（より学術的な推進を望むのであれば、科研費等他への応募に早目に

- 切り替えて進む方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場合
 3. 標準化の確立など、より適した予算が必要な場合

である。

研究の全期間においてこのガイドラインに従い、特に中間評価での評価を厳しく行ってきた。その結果、研究期間別では 5年 9件、4年 5件、3年 9件、2年 1件と 全 24 件の研究実施となった。

挑戦的な研究課題はリスクも大きいですが、成功すれば産業競争力強化につながる技術の確立にとって有効である。課題選考時の議論により、条件を付しての採択を行った例がある。中間評価時までには、提案した原理の実証、現象の観測が実現可能であるという根拠を示すという条件であった。実際、アドバイザーを納得させるには情報が不足し、本プログラムでは研究中止になったが、研究はその後も続いている。結果も出始めており、リスクの大きな研究の採択の、合理的な一つのやり方であると思っている。

(6) 研究費の配分

研究者はプログラム予定予算のほぼ満額に近い研究計画を用意し、全体計画を立てて申請し推進する。リスクの高い基礎研究から産業応用を目指す本プログラムの運営では、若干個々の研究課題への配分がたとえ減額になっても、出来るだけ多くの良い研究課題を採択したいと採択時に考えて行ってきたが、必ずしも思ったようにはできず常に制約が伴った。

研究課題間の配分については、産業展開の可能性が成果として見え始めてきた段階で、サポートを厚くするように配慮して行った。また、TTP や調査費用などの独自の試みを可能とするように、P0 の裁量で研究費を重点配分出来たのは良かった。

(7) 「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。この場は産業界などの技術テーマ提案者の出席が基本であるが、テラヘルツ波産業が未成熟であること、また開発技術の展開分野も未確定な場合も多いことから、より広い産業分野からの参画が重要と考えた。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、出席をいただいた。取り扱う研究分野の拡がりに伴い、より広い可能性を持つ産業分野に積極的に声掛けして、企業側の声を幅広く傾聴するようにも努めた。

深まった議論が可能になるように、毎回 1 泊 2 日での会を主宰した。また、開催場所についても、創造的議論がし易いような場所での開催に努めた。会議の場での議論とともに、その場ではできないような個別の産業界と研究者との十分なコンタクトも可能とした。同時に研究者間のより親密な情報交換や研究協力に大変役立った。この結果、この場から多くの共同研究や技術の協力、移転に繋がったものも出てきており、活用できたと思っている。

(8) アウトリーチ活動

1. TTP の活動

TTP の利用者には制限を設けず、一般企業の研究者の利用も可能とし、広く成果の普及と本活動の広報にも努めた。

2. 成果のプレス発表

大学と JST と共同で行ったものや、大学でのプレスリリースを JST 共創の web に掲載して行った。新聞、雑誌をはじめ、テレビやイベントなど数多い。

3. 産学共創の場（最終回）とシンポジウムの併設開催
産学共創の場は、クローズな会合で参加者とは秘密保持契約を交わして、最新の情報を討議してきた。最終回(2019/11/28)は締めくくりの会として参加は Web 申込で可能とした。研究を終了する研究者、および終了後の展開が顕著な研究者の特別講演に加え、終了した課題を含めたポスターセッションを持ち、全研究者が会した。また、シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端VI」と併設（連続）しての会議設定であり、多くの参加者（参加者 112 名）が集まった。
4. 新技術説明会の開催（2017/3/23）
新技術説明会は研究成果(特許等)の技術移転を目的として、テラヘルツ波分野の研究者、技術者に限らず、広く新技術や産学連携に興味のある企業関係者に向けて、研究者自らがプレゼンを行う説明会であり、終了課題・実施課題の中から、テラヘルツ波の光源や検出器など計 5 件を紹介した。当日は、244 名の来場いただき、改めてテラヘルツ波の技術への産業界から期待を実感するものとなった。これを契機として 産学共創の場への参画企業の増加、本技術テーマの他業種への認知度の高まりなど、本技術テーマのプログラム後半の推進に大きく貢献した。
参考 : https://shingi.jst.go.jp/list/kyousou/2016_kyousou.html
5. 国際会議・国内学会における本技術テーマの紹介（招待講演）
プログラム開始後 3 年目の 2013 年、再募集にあたりシンポジウムや研究会で、産学共創プログラムの紹介と提案応募の勧誘を行った。同年 9 月には応用物理学会シンポジウム「革新的テラヘルツ技術が加速する応用展開」でも 講演している。
2016 年 4 月には、韓国の国プロである“THz-Bio”の国際シンポジウムがあり、P0 である Prof. Gun Sik Park より招聘され、産学共創プログラムの紹介を行った。
2019 年 9 月には、金属学会の年会では「若手科学者へ送る研究のヒント」～未踏領域へ到達するために～ という特別企画で、未踏領域「テラヘルツ波研究」の取組を紹介。
6. 参加研究者は、学会活動でも中核的な活動をしており、多くのシンポジウムや国際会議の企画を積極的に行ってきた。2013 年の上記シンポジウムをはじめとして、テラヘルツのテーマでのこれら会議では、常に本技術テーマ参加の研究者が中心になって活動してきている。

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状況

(1) 課題評価結果を踏まえた最終目標の達成状況（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）

プログラム開始時のテラヘルツ波研究は、研究分野の立ち上がりとともに期待も大きく、特にわが国の研究者の個々の活発な活動は世界的にも注目されていたが、組織的なテラヘルツ波の研究プログラムは皆無であった。産業的には世界的に先行していたイギリスの T 社とともに、わが国の A 社もしっかりとした取り組みを進めてはじめていた。そのような中での本技術テーマの 9 年間の推進は、時宜を得たものであった。

2013 年に行った光産業コンサルタントのテラヘルツ波研究に対する調査報告（我が国の研究だけではなく世界の研究状況を俯瞰して）は、あまり大きくないテラヘルツ波市場に対して、どうしてテラヘルツ波なのかが明確でない。そして新技術で何ができるか、従来技術よりどう優れているかの明確化を強くもとめられた。また、2015 年の報告では、期待できる分野例として 1) 半導体の欠陥検査や高分子材料への適用、2) 生体分子の水和などのプローブ、3) 超高速データ通信、4) 超高電磁界印加の可能性 の指摘がなされた。「どうしてテラヘルツ波なのか、従来技術よりどう優れているかの明確化」は、全研究期間を通じて常に繰り返し明確な答えが出るように、研究者にもアドバイザーにも求め続けた。

また、2015 年に指摘された期待できる分野として挙げられていた 4 点は、結果として採択課題にすべて含まれた。

「テラヘルツ波」という広い基礎基盤研究の設定は、産業構造が未確立だったゆえに大変適したものであった。結果、テラヘルツ波光源とその検出器については、半導体ベースのもので従来技術よりはるかに優れていると言える成果が得られた。また、非線形光学に基づく光源の高出力化は、今後の応用展開に期待を持てるものとなった。テラヘルツ波計測法をはじめとして、新分野応用開拓研究の方向性を見極めは、あらたな産業展開を希求する多様な分野の産業界の人との接触が必要である。アドバイザーの助言や産学共創の場での企業研究者との議論から、研究の展開が開けた研究課題も数多い。

開発されたデバイスの中から、研究期間中や終了後に技術移転へと進んだ例も少なくない。一方、新計測法や新分野に繋がる展開では、共同研究や多くの問い合わせを受けている。JST の特色ある活動の一つである「新技術説明会」を、この研究課題で 2017/3/23 に開催した。その時の参加者は、長く行われているこの説明会の中で最多であったと聞いている。産業界の関心の高さが実感できた。

(2) 産業競争力強化につながる技術の確立に資する成果（特に、技術のブレークスルー（新指導原理、開発技術）、社会・経済の発展に繋がる重要な成果、派生して生まれた技術、等）

産業競争力強化につながる顕著な成果の代表例を、以下に述べる。早期に終了した研究課題については、その後の展開を合わせて紹介している。

【テラヘルツ波光源及びテラヘルツ波検出】

例 1 中間報告でも取り上げているが、東工大 浅田のグループの共鳴トンネルダイオード RTD は、室温動作でバッテリー駆動が可能な省電力動作であることから、電源を含めた光源セットの試作を P0 から依頼し、TTP での貸し出しに対応した最初のデバイスである。このグループの長年に渡る地道な研究が、このプログラムで形にできた。最近では 1.98THz という単体の電子デバイスでの世界最高周波数の発振を実現し、100 素子近いアレイにより mW レベルの高出力発生を達成している。通信への展開も含めて、幅広い応用に向けて歩を進めている。東工大の活動は RTD の重要性を認識させ、世界の複数の機関で研究が活発化しており、そのトップを走り続けていることは素晴らしい。

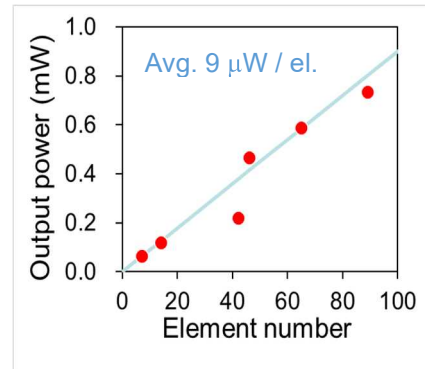
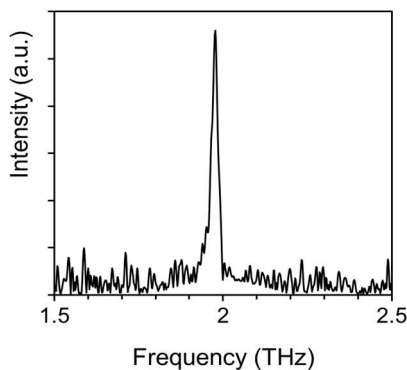


図 1. 98THz 発振(室温単体デバイスで最高) 図 89 素子アレイにより 0.73 mW@1 THz
R. Izumi, T. Sato, S. Suzuki, and M. Asada, "Resonant-tunneling-diode terahertz oscillator with a cylindrical cavity for high frequency oscillation", AIP Advance, vol. 9, 085020, 2019

例 2 半導体検出器では、北里大 伊藤のグループによる フェルミレベル制御バリア (FMB) ダイオードは、広帯域・低雑音等価電力 (NEP) 特性 を実現し、世界から注目されるものとなった。FMB ダイオードは広帯域・低雑音な THz 波検出器として、従来素子であるショットキーバリアダイオード (SBD) に比して格段に優れた特性を実証している。ヘテロダイン検出に適した広 IF 帯域版の素子も完成させた。この帯域では、世界で 2 社が SBD で市場を寡占しているが、FMB の特性はこれらの製品に比して格段に優れている。これら 2 種類 (基本モジュール及び広帯域版) の検出器素子は、TTP を通じて広く研究機関や企業での試用に供しており、使用した感想や改良希望などに対応しながら、既に技術移転も行われている。国際会議併設の展示会でも企業からの紹介があり、サンプル素子が世界に出始めている。さらに、1次元アレイ (100 ピクセル) のイメージングに適した素子の開発も行い、予備データを得ている。

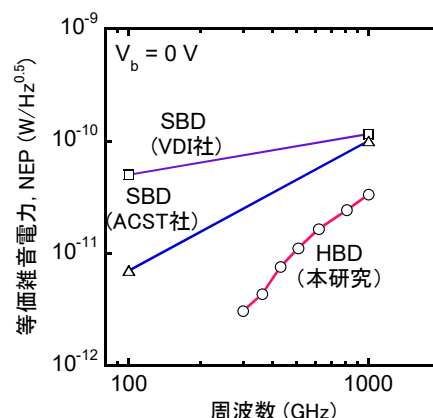
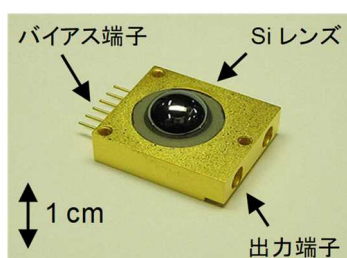


図 HBD モジュールの写真

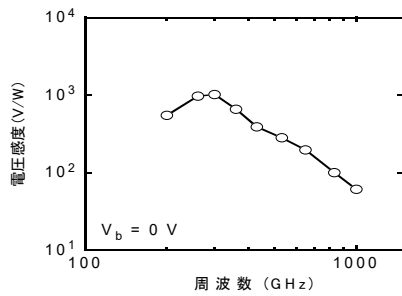


図 電圧感度の周波数依存性

図 等価雑音電力 (NEP) の周波数依存性

例 3 東大 平川らのグループによる MEMS の機械的共振周波数変化を信号とする新しいテラヘルツ波検出器は、これまでのボロメータと比較して、室温動作で $1\mu\text{K}$ の温度変化に应答し、動作速度が 2-3 桁高い。このことから、イメージングの高速化に適している。多くの応用が広がるイメージング用検出器として、新たな可能性を持つ。素子の真空封じやドライブ・検出回路の小型一体化は、産学共創の場などを通じて企業の協力が得られたことにより、到達できた成果である。最終年度で TTP に登録するレベルまで開発が進捗した。

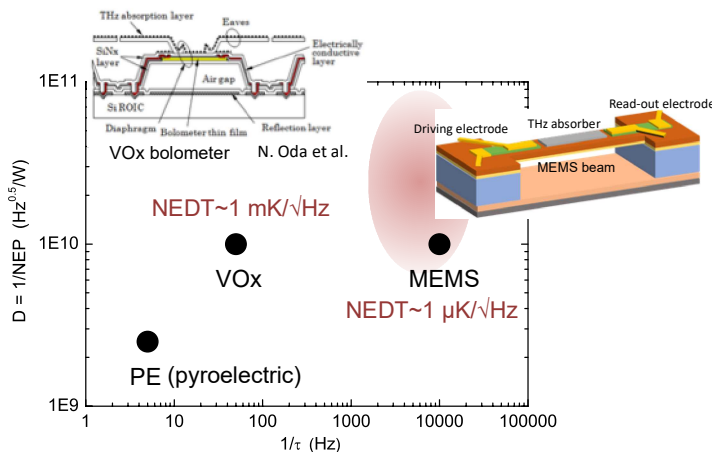


図 従来の室温動作熱型テラヘルツ波検出器 (焦電検出器、酸化バナジウムボロメータ) と今回開発した MEMS 検出器の、感度 (縦軸) と動作速度 (横軸) に関する比較。

例 4 大規模半導体光集積を目指した九大 加藤らのグループのデバイスは、これからの情報化社会に向けた挑戦でもある。レーザー、半導体アンプ、光位相調整器、そしてアレーフォトミキサとアレーアンテナの集積化という、規模の大きな光集積回路の実証は、わが国では大学でも産のレベルでもあまり活発ではない。プロトタイプ of 素子を用いて、30 度を超えるビームの高速ステアリングを実証したことは、Beyond 5G のシステム構築に新たな可能性を与えるという専門家の声も聞こえている。今後の展開に期待したい。

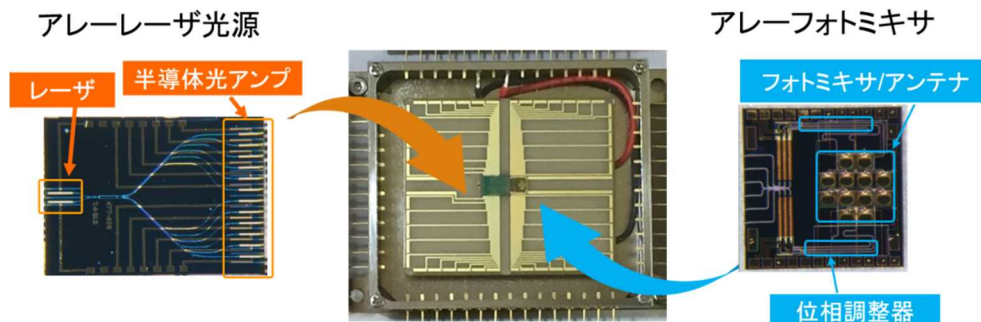


図 二つの集積回路チップを光結合した THz 波発生モジュール

例 5 センシングへの応用では、高出力な光源と高感度な検出が不可欠要素である。名大 川瀬、理研 南出グループは、独自開発の injection seeded - THz parametric generator : is-TPG の高出力化と、逆過程を利用した高感度検出手法を発展させた。その結果、継続した研究の新たな応用展開として、郵便物検査などへの応用や、爆発物や麻薬などから出る揮発性ガスの実時間検出装置を立ち上げ、性能実証して注目されている。また、企業との共同研究や技術移転も活発に行っている。

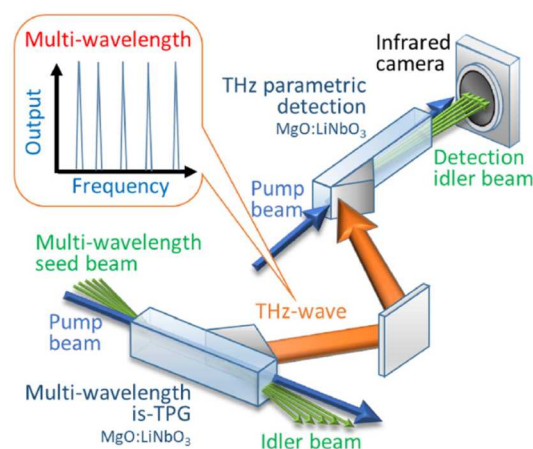


図 実時間多波長 THz 波発生・検出分光システム
Murate, Kawase, JAP 124, 160901 (2018)

【テラヘルツ波計測法・新分野応用開拓】

新規の計測法の提案とその実証の研究には、今後に期待を持てる成果を上げているものが多い。その適用分野として、高分子材料や生体関連物質などへと、広範に広がってきている。

例 6 慶大の渡辺らのグループの行った THz 時間領域偏光スペクトル計測により、これまで計測が難しかったゴム母材とカーボンブラックの間の相互作用の可視化ならびに測定時間の大幅な短縮を実現。ゴム材料はカーボンブラックにより赤外、電波に対して不透明なことから期待が大きい。光波の吸収が大きな高分子材料のひずみや疲労度計測などへの展開も進めている。

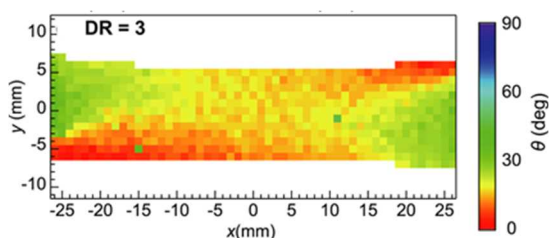


図 7 反射型 THz 偏光装置によって計測した、延伸率 3 倍の黒色ゴムの異方軸イメージング。角度 0 度が延伸方向

例 7 理研の保科らは、高分子の高次構造のテラヘルツスペクトル解析の手法を確立し、高

強度テラヘルツ波を用いて高分子の改質を目指す取組を行った。近年 THz 波がポリマー高分子の分子内再配列を引き起こすことを世界で初めて実証している。THz 波のエネルギーは大変小さく、化学構造を損傷せずに、特性や機能の改質の可能性が期待できる。

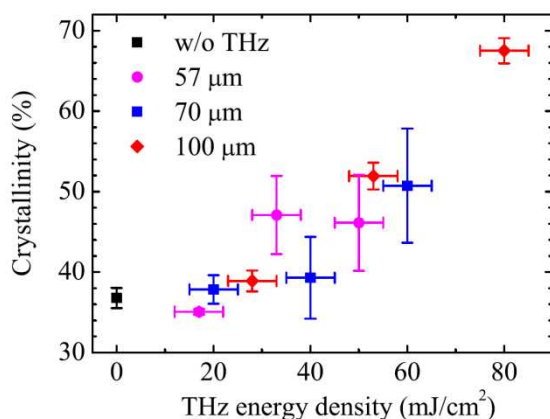


図 PHB film crystallinity with THz irradiation

H. Hoshina, H. Suzuki, C. Otani, M. Nagai, K. Kawase, A. Irizawa, et al., "Polymer Morphological Change Induced by Terahertz Irradiation", Sci. Rep., vol. 6, pp. 27180, 2016.

例 8 岡山大 紀和らはレーザー励起テラヘルツ波顕微鏡を発展させて、液体中のイオン濃度分布をマッピングできるテラヘルツ波ケミカル顕微鏡を構築してきた。生体試料の計測に優位なことから研究を続けてきた。近年国際研究により、乳がんを選択的に認識するアプタマーとの組み合わせで、転移性乳がん細胞の微小サンプルで高感度検出を報告している。今後の展開が期待される。

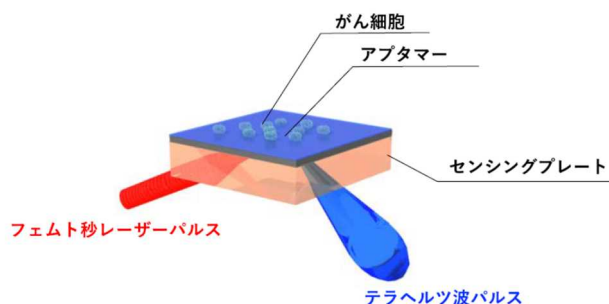


図 テラヘルツ波ケミカル顕微鏡による検出の概念図

E. M. Hassan, , T. Kiwa, et. al., "High-sensitivity detection of metastatic breast cancer cells via terahertz chemical microscopy using aptamers", Sensors & Actuators B:Chemical, 595, pp. 287-601, 2019.

例 9 千葉工大の水津らは、多くの物質が不透明なテラヘルツ波領域で、エバネッセントテラヘルツ波の情報を近赤外域での読み出す新たな分光法を提案した。理論的検討に基づき、提案の妥当性と有効性を実証した。現在では導波路構造を採用して、高感度化、小型化を達成している。

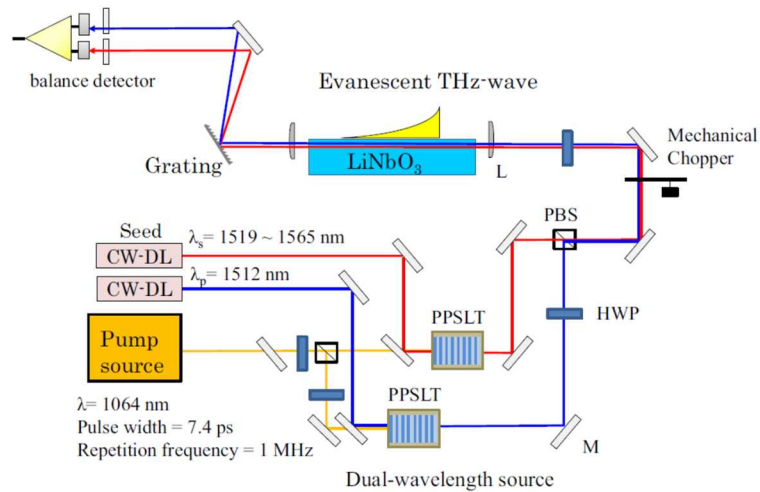


図 テラヘルツ波エバネッセント検出

T. Akiba, N. Kaneko, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Real-time terahertz wave sensing via infrared detection interacted with evanescent waves”, Opt. Rev. 22, pp. 166-169, 2015.

応用開拓については、新しい提案と手法の確認の後、その技術が認知されるようになるまでに時間がかかる。さらに、共同研究などでの試用の後に有効性が理解されてつつあるものも多い。また、上にのべた試作デバイスの技術移転のほか、広帯域テラヘルツ波発生モジュールや、偏光制御素子などの、テラヘルツ波光学部品類の技術移転例は、複数がこの産学共創プログラムの成果から出ている。

ここで紹介した例の他にも、多くの優れた成果が出ており、次のステージの研究につなげてさらなる発展をめざしているものや、共同研究を企業と進めているものなど多彩である。

次表には、全 24 課題の達成技術等について纏める。

表 4 技術のブレークスルー（新指導原理、開発技術）等

要素技術	項番	研究代表者 (所属 役職)	研究課題名	技術のブレークスルー（新指導原理、開発技術）等
高性能テラヘルツ波光源およびテラヘルツ波検出	01	浅田 雅洋 (東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 教授)	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	研究開始時は、単体の半導体電子デバイスで唯一室温において 1THz を超える基本波発振 (1.04THz) を達成した直後。構造の最適化によるさらなる高周波・高出力化を目指し、TTP を通じて多くの研究者にデバイスを提供。開発の手ごたえを得て、更なる高出力化、高機能化を目指して、活発な研究を続けている。
同上	03	川瀬 晃道 (名古屋大学 工学研究科 教授)	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	名古屋大学と理研との共同実施プロジェクト。非線形光学技術を最大限に活用し、テラヘルツ波領域では未だ達成されていない非線形導波路テラヘルツ波光源、および超高感度・非線形波長変換テラヘルツ波検出技術の開発を掲げて参画。具体的な応用も視野に両機関ともに目標以上の成果を出し、その後幅広く企業との共

				同開発につなげている。
同上	08	平山 秀樹 (理化学研究所 光量子工学研究センター テラヘルツ量子素子研究チーム チームリーダー)	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	THz量子カスケードレーザの動作高温化と周波数領域の拡大により、産業展開を目的に参画。発光層のバリア領域を高める構造で、非発光散乱の低減により低しきい値動作の達成するための理論解析及びデバイス製作を行った。高Al組成や間接注入による高温動作およびGaN系材料を用いた未踏周波数実現への可能性を示した。
同上	09	廣本 宣久 (静岡大学 創造科学技術大学院 電子工学研究所 教授)	1THz帯高検出能常温検出器技術の研究	従来の常温テラヘルツ波検出器の検出能を一桁改善するボロメータ実現を目指す提案。アンテナ結合型での実現を目指す。単素子構造での試作と動作測定を実施。バルクTi程度のTCRを持つサーミスタが実現できれば、予測される目標性能のマイクロボロメータ実現が示された。
同上	15	伊藤 弘 (北里大学 一般教育部 教授)	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	新たな設計思想に基づく、低雑音で広帯域な検出素子の提案で参画。プロセスを外部試作企業と共同で進め、早い段階からTTPに提供できるデバイスを実現した。その性能は世界トップのレベルを実現、試作を担った企業への技術移転により、既にデバイスが世界に提供されている。
同上	17	平川 一彦 (東京大学 生産技術研究所 教授)	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	MEMS両持ち梁振動子の梁中央部のテラヘルツ光による機械的応力変化を、梁の振動周波数変化で読み出すもの。基礎研究で熟知した半導体物性を生かした素子設計、利用しやすい読み出し回路設計を企業の協力で実現。ボロメータとしては高速応答性を持つ新規検出器を実現した。
同上	18	加藤 和利 (九州大学 システム情報科学研究科 教授)	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	半導体モノリシック光集積技術を開発し、1THz帯でのビーム走査および周波数掃引可能な高出力コヒーレントビーム発生技術確立を目指すもの。600GHz帯で光位相変化による高速ビームステアリングを実証。送受波のモノリシック光集積回路モジュールを試作して動作させており、beyond 5Gの通信にも期待される。
テラヘルツ計測法及びそのデバイス開発	04	水津 光司 (千葉工業大学 工学部 教授)	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	多くの物質が不透明なテラヘルツ波領域で、テラヘルツ波の情報を近赤外域での読み出す新たな分光法の提案。理論的検討に基づき、提案の妥当性の顕彰と有効性を実証した。課題の多いテラヘルツ帯検出器を必要としないシステム構成が特徴。
同上	05	紀 和利彦 (岡山大学 ヘルシステム統合科学研究科 准	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	テラヘルツ波放射顕微鏡の研究を発展させ、液体中のイオン濃度分布を検出するテラヘルツ波ケミカル顕微鏡の研究に特化。生体関連のNa ⁺ 及びK ⁺ イオンの濃度計測を行った。計測メカニズムを解明するとともに、細胞計測をはじめとするバイオセンシングへの応用の可能性を示

		教授)		した。
同上	11	安井 武史 (徳島大学 ポスト LED フォトニクス 研究所 所 長/教授)	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	充実した電波・光波の周波数群の不確かさを、 周波数コムによりコヒーレントにリンクして THz 波に分配し、THz 波帯で初めての周波数標 準技術を展開するもの。低圧ガス分光での評価 の成果に基づき、プロトタイプの分光システム を完成。
同上	13	渡邊 紳一 (慶應義塾 大学 理工学 部 教授)	高速・高精度テ ラヘルツ時間領 域ポーラリメー タの開発と産業 応用展開	THz 時間領域偏光スペクトル計測による高分子 ゴム材料の光弾性測定に対象を絞り込んで推 進。ゴム母材とカーボンブラックの間の相互作 用の可視化ならびに測定時間の大幅な短縮を 実現。
同上	20	谷 正彦 (福 井大学 遠赤 外領域開発 研究センタ ー 教授)	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	チェレンコフ E0 サンプリング法を追求し、高 感度・広帯域検出法の確立を目指す提案。テー パー付き金属導波路と E0 結晶の組合せで実現。
同上	24	坪内 雅明 (量子科学 技術研究開 発機構 関西 光科学研究 所 上席研究 員)	高速テラヘルツ カラーイメージ ング装置の開発	高速 THz スペクトル二次元画像観測 (THz カラー イメージング) 装置開発を行い、リアルタイムでの THz カラー画像の取得を目指すもの。大出力 THz 発生のための波面制御を、回折格子を組みこんだ 平板デバイスで可能にし、ラインセンサカメラでイ メージを取得。測定物の移動により格段に高速な イメージング取得を実現。
新分野 応用開 拓	02	小川 雄一 (京都大学 農学研究科 准教授)	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	外部刺激に対する細胞の変化を高感度に検出 する、金属周期構造体を利用した細胞—物質相 互作用計測ユニットの構築。細胞にとって重要 な水の振舞の理解を進め、酸化ストレス応答の モニタリングなど新たな現象の測定を可能とし た。
同上	07	永井 正也 (大阪大学 基礎工学研 究科 准教 授)	極限的高効率 T Hz パルス発生 技術の確立と高 性能物質—TH z 結合デバイス との融合と応用	高強度 THz 波を、生体分子系の現象生成や制御 に能動的に利用するという意欲的で基本的な 研究。高強度 THz 波パルス発生は達成したが、 期待の高かった THz 波非線形応答を利用した産 業応用の具体化は、原理確認に留まる。
同上	12	山下 将嗣 (理化学研 究所 光量子 工学研究セ ンター 上級 研究員)	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	広帯域高感度 THz 波エリプソメトリシステムの 構築により、アモルファスや導電性高分子、有 機半導体の薄膜材料評価への可能性を示した。 広帯域化により、有機半導体について高周波数 側でドルーデモデル的特性の観測を可能とし た。
同上	14	河野 行雄 (東京工業	ナノカーボン材 料を用いた新規	分光機能を可能とするチューナブル検出と室 温検出を、ナノカーボン材料を用いて展開。CNT

		大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 准教授)	テラヘルツ検出器の開発	フィルムを用いた光熱起電力効果を利用することで、柔軟性あるフレキシブル面状検出器への展開を図る。
同上	19	永井 正也 (大阪大学 基礎工学研究科 准教授)	テラヘルツレーザー脱離イオン化法の開拓	テラヘルツ波領域のレーザーによるマトリックスフリーな質量分析の可能性の追求。当初期待していたソフトな脱離イオン化の実現が容易ではないことが分かる。
同上	21	梶原 優介 (東京大学 生産技術研究所 准教授)	エバネッセント波のナノスコープによる新規物質計測法の開拓	誘電体のテラヘルツ帯近接場光をとらえることができる CSIP 検出器のマルチカラー化と極低温で動作するナノ分解顕微鏡の実証を目指す。室温での非平衡状態のホットエレクトロンやグラフェンの電子状態について、これまでにない解析ツールとしての可能性を示した。
同上	22	大道 英二 (神戸大学 理学研究科 准教授)	テラヘルツ電子スピン共鳴イメージング法の開発	THz 波を用いる電子スピン共鳴により、空間分解能を2桁以上の改善を目指す提案。リチウムイオン電池などのキャリア挙動の検出など広範な技術課題解決に繋がる可能性を持つことが示された。
同上	23	小川 雄一 (京都大学 農学研究科 准教授)	細胞計測を目的としたテラヘルツ近接アレイセンサの開発	がんとの相関が高いCTC検査の画期的な時間短縮を目的に、半導体 THz 波近接アレイセンサによる非標識単一細胞解析をめざす。従来法を含めて開発が加速しているテーマでもあることから、2年間で基本実証を採択条件に課した。可能性を示す一部結果は得られたが、限られたCMOS センサーアレー数でどの程度統計的に可能かなどの問題が残された。挑戦的な新たな手法でもあり、今後の展開を期待する。
テラヘルツスペクトル情報の解明	06	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)	凝縮相テラヘルツ分子科学の深化	物質のテラヘルツ帯スペクトルから、分子間相互作用が分子について何を語るかは、根源的な問いである。運動を分子間振動、ライブラクション、分子内振動の3つに分解して解析する手法を確立。薬剤などの結晶多形への応用をはかる。
同上	10	保科 宏道 (理化学研究所 光量子工学研究センター 上級研究員)	テラヘルツ分光による高分子構造の解明と操作	高分子の高次構造についてのスペクトル解析と、高強度テラヘルツ光を用いて高分子の構造的、機能的変化の制御を目指す提案。ポリマーの解析を可能とし、今後の新機能素材の開発に繋げる。
同上	16	佐藤 春実 (神戸大学 人間発達環境学研究科 教授)	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	ポリマーの構造変化や劣化現象を、テラヘルツスペクトル変化により検出する手法の開発。太陽電池モジュールの封止剤としても用いられるEVAについて、THz領域に現れるピークの半値全幅による評価の可能性を示した。

(3) 個別の産学共同研究への発展状況

添付資料 §6 に、企業との連携事業がまとめられている。研究では、成果に基づき次の研究に発展的に継続するのが常である。そこで展開する成果のすそ野はさらに幅広いものがあり、全てを網羅することはできていない。

研究課題の研究内容を大きく4つに分類しているが、世界をリードする成果の産学共同研究への発展状況にもその特徴が見える。

高性能なテラヘルツ波光源およびテラヘルツ波検出は、「テラヘルツギャップ」と呼ばれるこの分野の弱いところを補い、応用展開を図る上で不可欠なものである。半導体ベースの小型デバイスは、その性質上試作デバイスの数を増やして、研究遂行中に実際に関心ある研究者（広く一般の企業も含めて）に利用してもらい、そのフィードバックを研究に生かすことが有効と判断して、早期の段階でテラヘルツテクノロジープラットフォーム（TTP）を立ち上げた。TTPは、試作した計測装置も含まれるが、貸与して評価できる半導体デバイスには特に有効であった。代表的なTTPの利用例は、RTD 13件、FMB ダイオード15件、広帯域FMBダイオード10件を数えるに至った。また、高出力で高品質な光源での成果も大きく、産業展開に繋がりがつつあるものも数多い。

2018年には、これら半導体テラヘルツ技術と出力の大きな光レーザー励起のテラヘルツ技術を融合して産業利用に向けた技術確立を行う、JST 未来社会創造事業 ACCEL 「半導体を基軸としたテラヘルツ光科学と応用展開」（研究代表者 田中耕一郎、PM 深澤亮一）が開始された。新たな成果創出が成されつつあると聞いている。これも、産学共創プログラムでしっかりとした基盤技術の確立を図った結果である。

新規の計測法や、新分野応用開拓に含まれる研究課題群では、関心を持つ企業の個別な活動からスタートすることが多く、新技術説明会でも多くの関心が集まった。産業界として広く関心が持たれるに至るには、時間とともに継続した努力が必要となる。研究期間終了後に、新たな企業との連携も数多く始まっている。

物質のテラヘルツスペクトルの理解は、テラヘルツ波の応用に当たって分子の持つ学術的情報を与えるもので、根源的問題である。これまで見るのが難しかった材料の状態変化の理解や、高分子材料科学に繋がる情報は、多くの応用展開の可能性を持つ。産業応用の展開で、その重要性は今後一層増大する。

(4) 技術テーマとしての成果を産業化に繋げるための方策・課題等

基礎基盤研究の成果がすぐに産業に繋がることを求めることは、アーリーステージの技術テーマでは適当ではない。むしろ、近い将来に大きな変革をもたらすような基礎の学術成果を、産業界が十分な関心が持てるレベルにしてきちんと橋渡しができる形に上げることが大切と考えて活動をしてきた。そのためにも重要なことは、成果を産業につなげるためのシーズの特長が明確で勝つ優位性が明確でなくてはならない。

中間評価の時に既に報告したが、光産業の新技术立上げを多く見聞き、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、テラヘルツ波研究と産業の調査依頼を企画立案し、2013年に実行することができた。大変限られた予算であったこともあり、調査手法としては代表的なテラヘルツ国際会議に参加し、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を調査するものであった。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、我々が気付きにくい指摘もあり、その報告書を研究者や企業研究者と共有した。また、プロジェクト推進に有益であることから、2015年にも行った。

報告書で指摘している主なところをあらためて纏めると以下の様である。なお、調査した2つの会議はともに代表的なテラヘルツの国際会議であり、産学共創プログラム参加者の発表も数多く含まれていた。

2013 report での指摘

38th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Wave (IRMMW-THz2013)

テラヘルツ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、どうしてテラヘルツなのか? 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く、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テラヘルツなのか (新技術で何ができるか、現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。

2015 report での指摘

Optical Terahertz Science and Technology 2015 (OTST 2015)

会議自体がより学術的色彩が強かったこともあり、テラヘルツ技術への提案が述べられた。

テラヘルツにより期待できる分野としては、以下の4分野をあげている。

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-プロープ法などの利用。半導体の欠陥検査や、高分子材料の高分解能計測に適用。

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。テラヘルツ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、テラヘルツ放射は集光などにより大変強い場を生じさせることができる。これにより材料の改質、例えば電磁スピンの回転などの可能性。

700GHz をこえるスイッチスピードの FET が発表されており、optical terahertz と electrical terahertz 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 terahertz 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技術テーマになりうるのではないだろうかとの指摘。

このレポートの指摘にもある「どうしてテラヘルツ波なのか」については、代替できる従来技術との比較検討が不十分な研究課題も少なくない。この点が明確な研究課題は、しっかりとした目標やマイルストーンの設定ができ、進めやすい。研究課題の開発が十分スムーズに進行した時に従来技術と比較してどのような優位性があるのかについては、提案時によりしっかりした検討が必要である。また、代替する従来技術が無い新しいものでは、当初想定する適用分野ではないところで利用されることの方が常である。そのためにも、産学共創の場のようなある程度クローズな場で、異なった産業分野の研究者の参加と発言・議論は、実際に研究担当者にとって有意義であるとともに、企業研究者にとって有効であった。

また JST が行う新技術説明会では、まったく接点のない企業や業界からの参加が得られ、多方面に情報発信ができ、重要であった。

TTP の試みは、本技術テーマのような産業が未成熟な技術分野の開発には特に有効であるという確信が得られた。TTP では、企業からの申し込みを非公開で受け付けることも可能として対応した。その場合でも、研究者には必要な情報提供を条件として対応してもらった。利用者からの新たな応用展開の情報や、そのためのリクエストから、その後の開発に生かすことができた。このような反応は、技術移転を考える企業の決断を速める効果にも繋がったと考える。

(5) 今後のプログラム運営への提言

基礎基盤研究で開発した新しい成果では、特性が革新的であればあるほどどのような分野に利用できるかまだ明確でない場合が多い。そのようなプロジェクトには、テクノロジープラットフォーム制度は有効であろう。ImPact の佐野プログラムで作り上げたユビキタス・パワーレーザーや、NEDO のプログラムで開発を進めた 京大（野田）の フォトニック結晶レーザーでも、広く申し込んで試用できるように個別にプラットフォームが用意されているようである。

本プログラム終了後 1 年（令和 2 年度）は他の産学共創プログラムが走っていることから、幸い TTP の運用が継続してできることになった。しかしその後は、このプラットフォームの取組みを残すことは難しいようで、残念である。テラヘルツ波の分野に限らず、研究成果として生み出された装置・デバイスの試用を可能とするプラットフォーム事業を実施することは、優れた技術を「死の谷」に埋もれさせないためにも有益であり、研究支援の体制として事業化することを今後検討いただきたい。

知財については、産業界のアドバイザーから取組の不備が指摘されたこともある。知財の取り扱いには各大学等に任されて対応はバラバラであるが、国際特許申請を必要とするような重要度の高い知財創出時に、その戦略と国際出願支援の相談が気軽にできるシステムが JST にあると、研究者にとって良いのではないだろうか。特に産学共創プログラムでは、研究主体に企業が入らないために、各大学の経費だけでは対応が困難である。

研究課題の中間評価は、プログラムを活性化し、より良い成果を得るために大変重要である。毎回厳格に厳しく評価を行い、研究非継続とした例も少なくない。当然新たな追加公募を期待したが、評価と公募はスムーズには行われなかった。年度予算制度の為、追加公募の有無や時期の決定はしばしば遅延し、本来ならばさらにいくつかの有望な課題の採択が早くにできたところであり、結果として 1 年早い 9 年で、本課題の終了を迎えてしまった。残念である。技術テーマの実施期間内は、当初計画に基づき、安定的な予算確保がなされるようお願いしたい。

10 年という現在では長期にわたるプログラムの設定は、アーリーステージの技術テーマでは大変重要である。今後も 10 年程度の中期的な視点にたった研究プログラムを継続戴くことが望ましいと考える。また、研究の継続はまさに力であることから、今後 テラヘルツ波関連の技術展開に繋がるプログラムを継続して設定することが、産業化に不可欠と思う。

9. 技術テーマ中間評価時の指摘事項に対する対応状況

技術テーマ中間評価時の指摘事項に対する対応

1. スタート時の採択では、研究課題公募のスコープを準備したテラヘルツテクノロジーフォーラム（TTF）のメンバーが多く、今後はより広い視野・分野で課題を募集し、多様な課題が採択されること
中間評価時では、第1回の公募で採用した12件の活動評価が中心であった。その段階で9件の採択が終わっており、既に研究開始していた。中間評価以降の新規研究課題の採択は、平成28年採択の3件にとどまった。第2回以降の公募で採用した12件については、上記指摘に対応できてきた課題採択が成された。
スペクトル解明の計算科学の専門家の参入も指摘されたが、その後の採択件数の少なさと無応募のため、対応は不可能であった。
2. 既存のテラヘルツ波研究コミュニティ内の交流に留まらず、広い分野からの意見、批評が得られるような運営を要望
産学共創の場に、化学産業やバイオ関係の企業研究者を積極的に招待して、議論に参加してもらう対応を取った。
3. TTPを通じて広い範囲のエンドユーザーの試用に供することは、新たな産学連携に繋がる可能性がある。そのためP0による重点化した予算配分などの運用を期待
TTPの活動に必要な額を期中での増額対応を含め予算を確保し、P0が必要と判断した研究課題に重点配分し、試用デバイスの製作費に充当した。中間評価でTTPには高い評価をいただいたことから、研究費と別枠での予算設定も求めたが、こちらは実現には至らなかった。

10. 総合所見

本プログラム遂行中の9年間は、充実したアドバイザーの協力のもと、アーリーステージの技術テーマから産業に展開するために、産学共創の場の活用やTTPの提案と実施など、多くのことを推進することができた。技術テーマ中間評価の後押しもあり、一定の成果を生み出すことができたと考える。

「産学共創の場」の外部参加者は、当初の設定では研究課題公募でテーマのスコープを準備した組織のメンバーということになっていたが、本技術テーマでは産業界自体がまだ未構築・未成熟であることから、学振182委員会の企業委員や、研究課題が想定する応用分野や進捗に合わせて新たな業種の研究者にも参加を促し、話を伺い、情報を共有した。研究成果を、特に産業界の人によりよく理解し、使ってもらえるようにするには、使いやすいシステム化も必要である。この点は企業技術者がはるかに知識を有していることから、研究者が必要とすることに対し、相談や技術の提供にも載っていただくことも多々あった。これは、一泊二日の場も設定が有効に寄与したと考えている。

本技術テーマに取り掛かる前と今では、テラヘルツ波研究・開発の環境は大きく変化している。テラヘルツ波帯の通信への周波数割り当てが決まり、beyond 5Gが産業的にも大きなテーマとなってきている。半導体デバイスの発振器や検出器、光集積素子からのテラヘルツ波の高速ビームスキャンの実証結果などは、この分野にも今後大きく貢献するものである。無線システムの専門家からは、高速ビームスキャンに期待の声を聴いている。光通信の発展は通信のみならず、光計測や光応用のあらゆる面で、光技術に大変革をもたらしてきた。同様にテラヘルツ波通信の展開は、テラヘルツ波応用の一層の展開にも繋がることは間違いない。

テラヘルツ波帯は本質的に出力が得られにくい狭間の帯域であることから、特にセンシング応用には光源の出力増大が課題である。光波領域の光源には、半導体レーザーやLEDをベースにしたものと、より高い出力が得られる固体やファイバーレーザーの双方が共に不可欠であるように、テラヘルツ波の応用においても、半導体テラヘルツ技術と光レーザー励起テラヘルツ技術の両者の展開が重要である。本技術テーマの成果として目に見え始めてきた使いやすいテラヘルツデバイスを利用して、さらに次の段階に進めようと、JSTのACCELプログラム「半導体を基軸としたテラヘルツ光科学と応用展開」（研究代表者 京大 田中耕一郎）が動き始めている。この分野については、しっかりと開発が引き継がれており、心強い動きである。計測の産業応用は多彩である。信頼性、スピード、サイズ、消費電力、価格等、大変ハードルも高いが、今後産学共同で世界のトップとして前に進めるように、産業界の意欲ある取り組みにも期待したい。