

**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」**

追跡評価用資料

令和4年1月

目 次

1. 技術テーマの詳細	3
(1) 概要	3
(2) プログラムオフィサー (PO)	3
(3) アドバイザー	3
2. 追跡調査の概要	5
(1) 調査の目的	5
(2) 調査の対象	5
(3) 調査の方法	7
3. 追跡調査結果	8
(1) 研究開発の継続状況	8
(2) 研究開発資金等	12
(3) 研究開発成果 (科学技術や社会・経済への波及効果)	14
(4) 主な研究活動 (主要論文、特許、受賞、テレビ、新聞報道等)	17
(5) 研究開発成果に対する制度支援の効果等	42
4. 総合所見	44

1. 技術テーマの詳細

(1) 概要

「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、令和元年度終了）

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た。

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を期待している。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か推進した。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した。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した。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 (P0)

伊藤弘昌（東北大学 名誉教授）

(3) アドバイザー

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術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。

表1 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 I C T 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

※所属、役職は技術テーマ終了時の情報に基づく。

2. 追跡調査の概要

(1) 調査の目的

追跡調査は技術テーマ終了後、一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況を明らかにし、JST（科学技術振興機構）事業の改善に資することを目的に行うもので、研究終了後から現在までの研究課題の発展状況等を調査した。

(2) 調査の対象

本追跡調査は、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」（略称）（平成 22 年度～令和元年度）の採択課題を対象とした。表 2 に追跡調査対象課題を示す。

表 2 追跡調査対象課題（採択課題）

採択年度	終了年度	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	先端非線形フォトニクス・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 大学院ヘルスシステム統合科学研究科 准教授 → 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 大学院基礎工学研究科 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 テラヘルツ量子素子研究チーム チームリーダー → 平山量子光素子研究室 主任研究員	THz 量子カスケードレーザー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 → 静岡大学 創造科学技術大学院 客員教授 (静岡大学 名誉教授)	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 テラヘルツ量子素子研究チーム 上級研究員 → テラヘルツイメージング研究チーム 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 テラヘルツイメージング研究チーム 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 → 東京工業大学 科学技術創成研究院 特定教授、中央大学 理工学部 教授、国立情報学研究所 客員教授	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 大学院 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 大学院 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 大学院 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 大学院 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 大学院 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

(3) 調査の方法

研究代表者に依頼して、研究開発の現状に関する調査票に回答頂いた。回答頂いた24課題について本追跡評価用資料をまとめた。回答内容のうち、共同研究を実施する企業名、共同研究費等の機密性の高い情報は非公開とした。なお、本追跡評価用資料の公表にあたり、研究代表者から記載内容の確認と公表の許諾を頂いた。

3. 追跡調査結果

(1) 研究開発の継続状況

① 継続状況

本技術テーマで実施した研究開発の現在の継続状況を図1に示す。本技術テーマの研究開発課題24課題(2課題は2度目の採択あり)の内、16課題(67%)が「A. 現在も継続している」と回答している。また、2課題(8%)については、「C. 一旦中断しているが、条件が揃えば再開する予定である」、4課題(17%)が「E. 研究開発は断念したが、派生的に創出された成果について研究開発が継続している」としている。一方、D. 「研究を中止した」課題は2課題(8%)となっている。

多くの研究課題が、当時の研究を継続、もしくは派生的に創出された成果について研究開発を継続しており、技術テーマ全体としての研究課題の設定、研究計画は妥当であり、継続的な研究の発展性がある研究課題が大多数であったことがうかがえる。

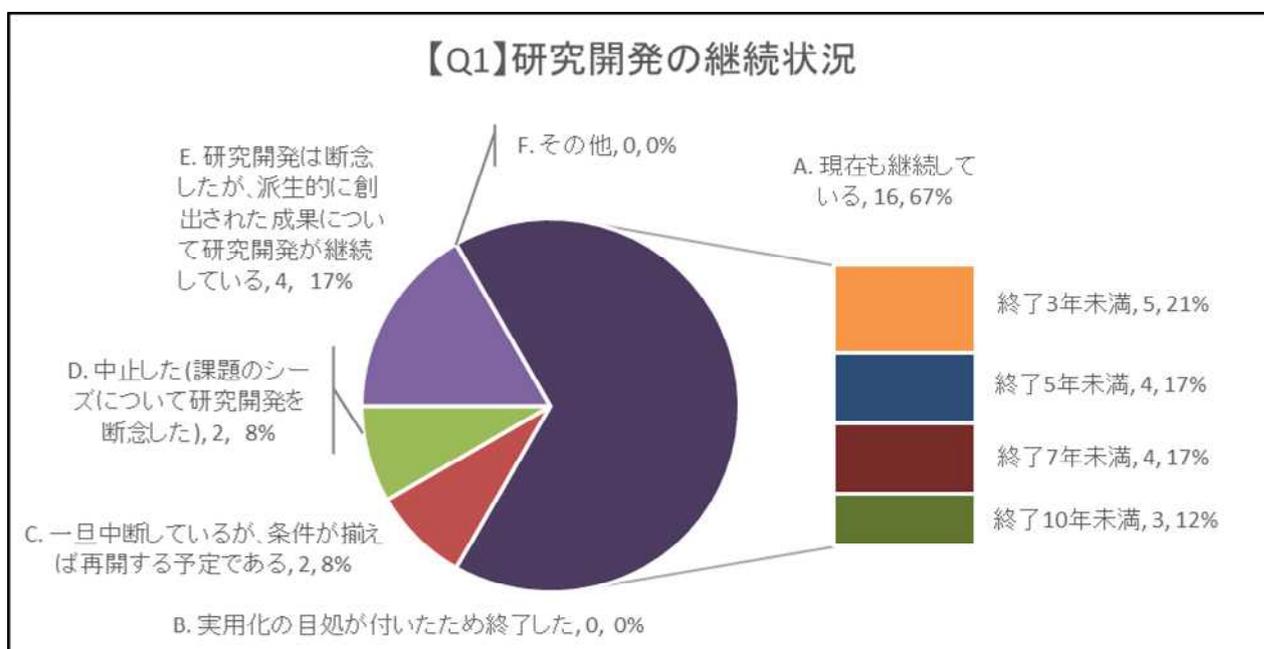


図1 研究開発の継続状況

② 現在の研究開発体制

①で「A. 現在も継続している」もしくは「E. 研究開発は断念したが、派生的に創出された成果について研究開発が継続している」と回答した研究課題の現在の研究開発体制を図2に示す。

現時点で産業応用、実用化に向けて企業との共同研究開発を実施している課題（選択肢A、B及びC）は計7件（計36%）となっている。企業との意見交換を通じて産業界のニーズを把握する場としての産学共創の場が有益であったとの複数の回答をいただいております。本技術テーマで設定した産学共創の場が有効に機能していたことがうかがえる。一方で大多数（15件、60%）は、「E. 自機関での基礎研究（大学との共同研究を含む）」の基礎研究のステージにある。

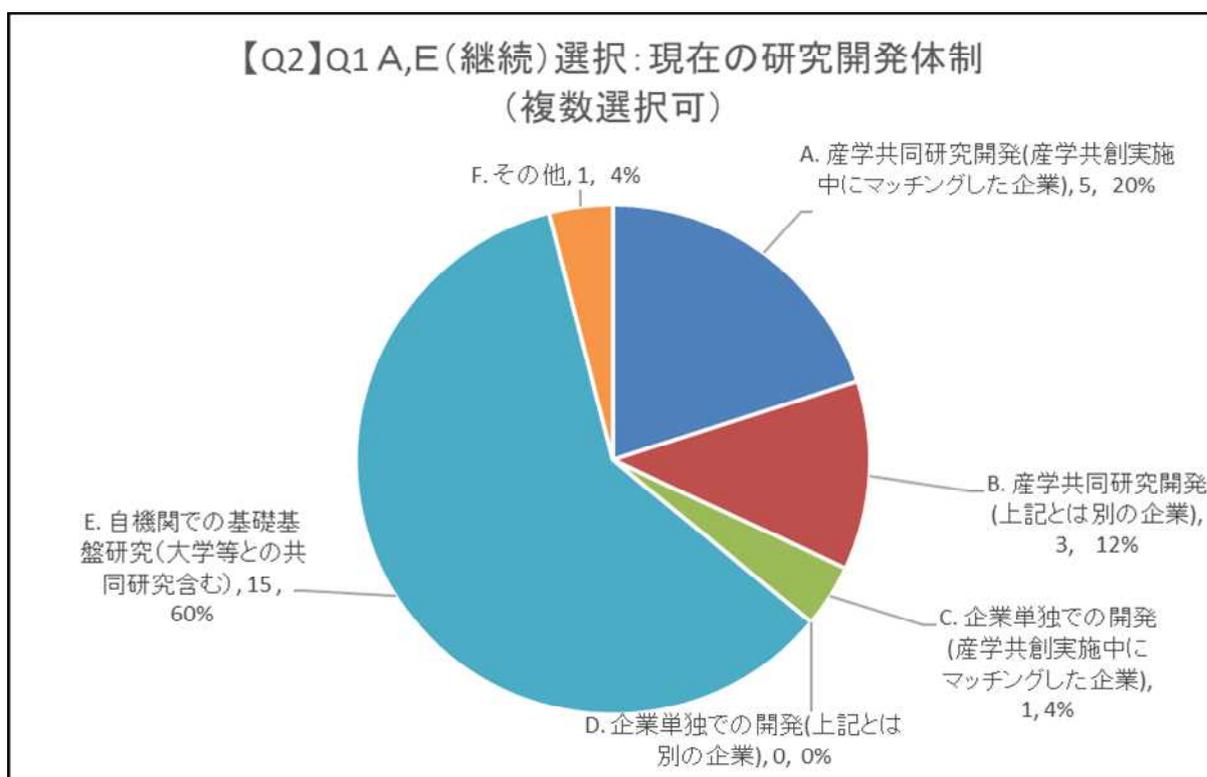


図2 現在の研究開発体制

③ 派生的に創出された成果

研究課題ごとに「(3) 研究開発成果（科学技術や社会・経済への波及効果）」で記載する。

④ 研究の中断・中止の理由

①で「C. 一旦中断しているが、条件が揃えば再開する予定である」もしくは「D. 中止した(課題のシーズについて研究開発を断念した)」と回答した研究課題(計3課題)が研究開発を中断・中止した理由を図3に示す。

「E. 実用化に必要な技術的目標を満たせる見込みがない」ため中止したとの回答が1件(17%)となっている。一方で研究のリソースに関わる「A. 研究開発資金の不足」「B. 研究開発人材の不足」が各2件(33%)となっており、本技術テーマの研究課題終了後の新たな競争的資金などの確保、研究室が取り組んでいる他の研究テーマとの研究要員の割り振りなどに難しさがあったことがうかがえる。

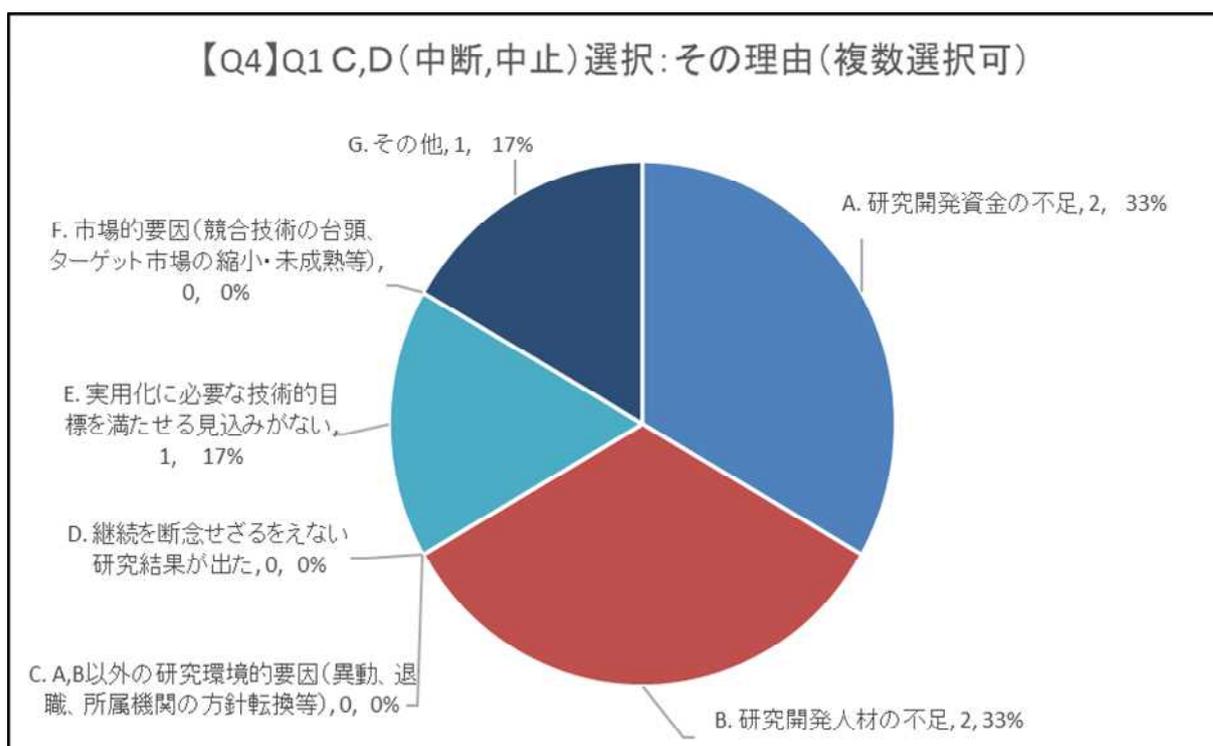


図3 研究中断・中止の理由

⑤ 進捗状況（技術成熟度）

研究開発を継続している場合は現在の、中断・中止した場合はその時点の技術成熟度を図6に示す。

各回答の件数は以下の通りである。

1. 基礎研究(発明:基本原理の明確化) : 2 課題 (8%)
2. 基礎研究(発明:技術シーズの形成) : 1 課題 (4%)
3. 基礎研究(可能性検証:要素技術や動作原理の検証) : 14 課題 (58%)
4. 応用研究・開発研究(可能性検証:実験室レベルでのプロトタイプ評価) : 3 課題 (13%)
5. 応用研究・開発研究(実用性検証:実用環境でのプロトタイプ作製) : 3 課題 (13%)
6. 応用研究・開発研究(生産技術開発:実用環境での生産検証) : 1 課題 (4%)
7. 実用化開発(生産技術開発:少量パイロット生産) : 0 課題 (0%)
8. 実用化開発(市場投入:生産体制構築) : 0 課題
9. 実運用(市場拡大:製品生産・出荷) : 0 課題

製品量産の一手手前である「6. 応用研究・開発研究(生産技術開発:実用環境での生産検証)」のステージに到達している研究課題が 1 件 (4%)、実使用環境での技術検証に到達している「5. 応用研究・開発研究(実用性検証:実用環境でのプロトタイプ作製)」が 3 件 (13%)、「4. 応用研究・開発研究(可能性検証:実験室レベルでのプロトタイプ評価)」が、3 件 (13%) となっている。全体の 30%が、実用化に向けた前段階のステージに到達していることがわかる。一方で、研究課題の 70%は、基礎研究のステージにとどまっている。

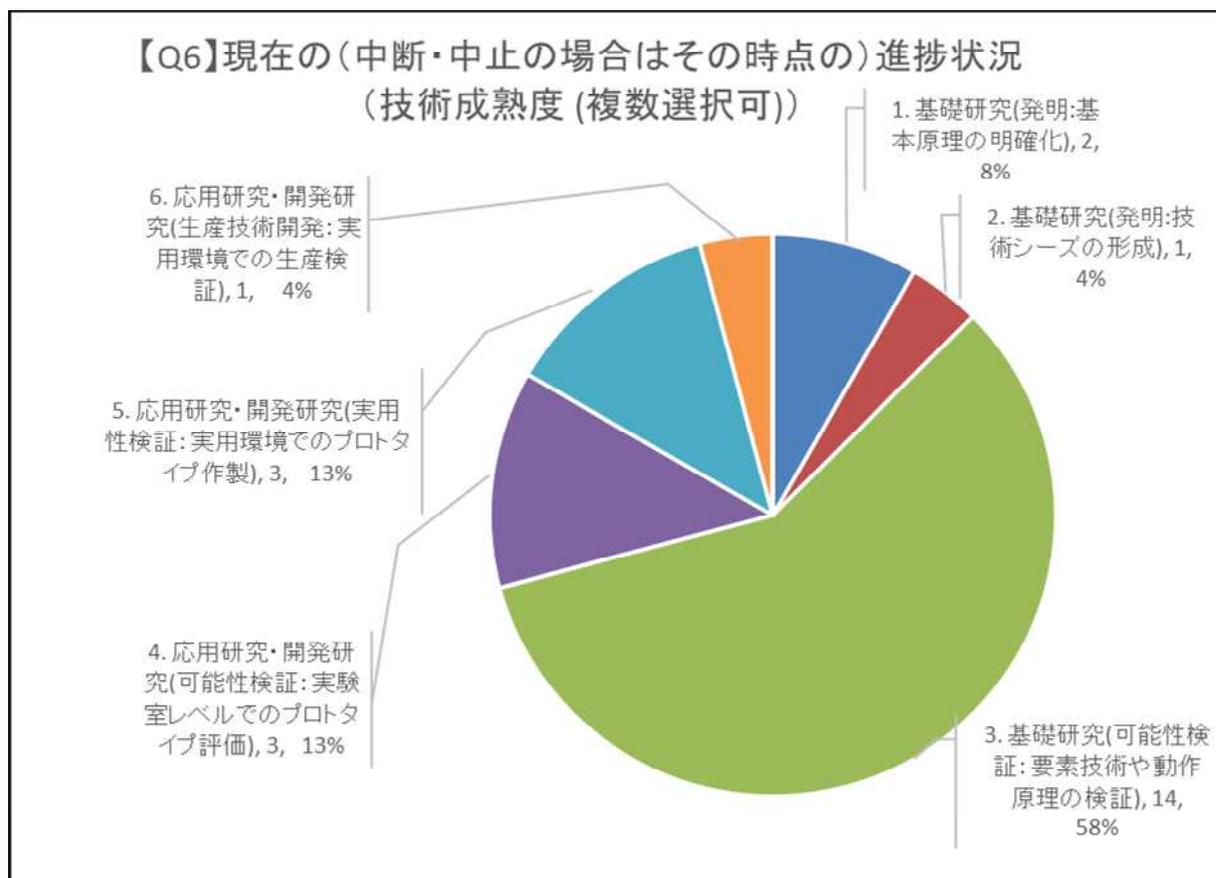


図4 技術成熟度

(2) 研究開発資金等

① 資金の種別

「(1) 研究開発の継続状況 ①継続状況」で「A. 現在も継続している」、「B. 実用化の目処が付いたため終了した」もしくは「E. 研究開発は断念したが、派生的に創出された成果について研究開発が継続している」と回答した研究課題の、本技術テーマにおける研究開発終了後から現在までの研究開発資金を図5に示す。

「(1) 研究開発の継続状況 ①継続状況」で「A. 現在も継続している」、「B. 実用化の目処が付いたため終了した」もしくは「E. 研究開発は断念したが、派生的に創出された成果について研究開発が継続している」と回答した研究課題の、本技術テーマにおける研究開発終了後から現在までの研究開発資金を図5に示す。各回答の件数は以下の通りである。

回答（複数選択可）：

- A. 企業の自己資金で実施：1件（4%）
- B. JSTの競争的資金等で実施：4件（15%）
- C. JST以外の競争的資金・公的資金で実施：17件（66%）
- D. その他の資金で実施（他社からの投融資など）：4件（15%）

研究課題の終了後は、企業からの資金提供、競争的資金（JST、他の公的資金）により、研究開発を進めている課題が多く85%を占めている。研究の継続には、企業の資金提供、または、競争的資金等の確保が基本的に重要な要素であることがうかがえる。企業の資金による研究が計19%と少ないのは、開発ステージにある研究の数に対応しているためと推察する。

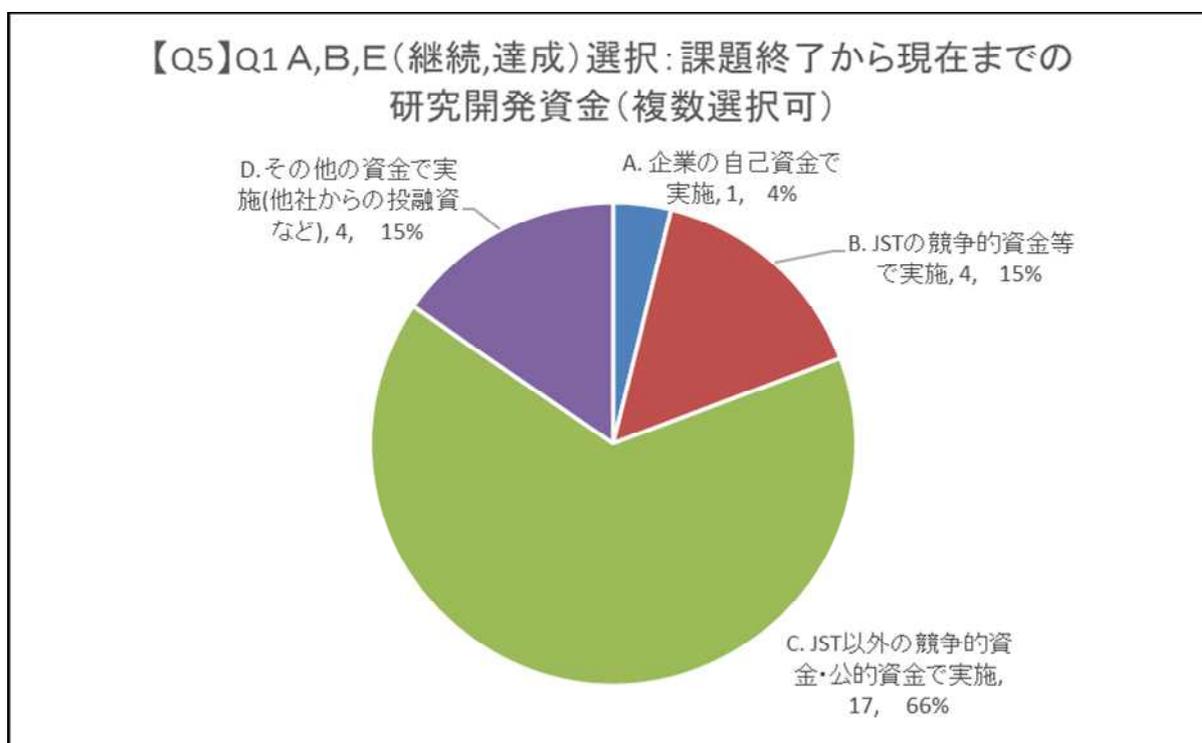


図5 研究開発資金の種別

② 資金の獲得状況（公的研究資金）

本技術テーマにおける研究開発終了後に獲得した公的研究資金のうち現在実施中のものを表3に示す。

表3 公的研究資金リスト

項番	研究代表者	資金の詳細（制度名「課題名」、実施期間、代表者）
01	浅田雅洋	JST ACCEL「半導体を基軸としたテラヘルツ光科学と応用展開」(2017～2021)、田中耕一郎
02	小川雄一	AMED 橋渡し研究加速ネットワークプログラム（シーズA）「サブテラヘルツ CMOS アレイセンサによる薬剤耐性菌の迅速診断法開発」(2020～2021) 代表機関 兵庫医科大学
03	川瀬晃道	(i) JSPS 科研費基盤A 「ワンパルス高速テラヘルツ分光システムの開発」(2019～2023) 川瀬晃道 (ii) JSPS 学術国際交流事業「新テラヘルツ波領域における高出力発生および高感度検出に関する研究」(2020～2022) 南出泰亜 (iii) 防衛省 大規模研究課題S「超小型ロバストテラヘルツ波イメージング装置の研究開発」(2020～2024) 南出泰亜
05	紀和利彦	経済産業省 戦略的基盤高度化支援事業「次世代電池の開発加速を実現する充放電時の内部電位可視化装置(テラヘルツ波ケミカル顕微鏡)開発」協和フインテック株式会社 (2019-2022)
09	廣本宣久	Karlsruhe Institute of Technology (KIT) Cooperative Research Project「生体医歯検査応用のための非侵襲・非破壊テラヘルツイメージング技術の研究」(2021) Bründermann, Erik
11	安井武史	総務省 委託研究：令和3年度から新たに実施する電波資源拡大のための研究開発「無線・光相互変換による超高周波数帯大容量通信技術に関する研究開発：光電気相互変換技術」(2021～2024) 安井武史
13	渡邊紳一	文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)「光量子科学によるものづくりCPS化拠点」(2018～2028) 藤井輝夫
14	河野行雄	(i) JST 未来社会創造事業「計測・解析融合による高速分光超解像赤外イメージング」(2020.11～) 河野行雄 ((中央大学) (ii) A-STEP 令和2年度「トライアウトタイプ」(2021～) 河野行雄 (東京工業大学) (iii) JSPS 科研費基盤研究B「テラヘルツ・赤外光電場の3次元制御と階層的トポロジーを持つ物質のナノスケール分析」(2021～2023) 河野行雄 (iv) JSPS 学術変革領域研究(A)「ものづくり現場の非破壊検査における匠の技の科学的理解と視覚増強への応用展開」(2021～2022) 河野行雄 (v) JSPS 科研費基盤研究(B)「ストレッチャブル光センサ素子の塗布形成とイメージングシステムへの応用」(2019～2021) 荒木徹平 (vi) JSPS 科研費基盤研究(A)「決定論的ドーピング法に基づく量子物性制御とその確率的情報処理・量子計測への応用」(2018～2022) 品田賢宏

15	伊藤弘	(i) JST、ACCEL「半導体を基軸としたテラヘルツ光科学と応用展開」(2017~2021) 田中耕一郎 (ii) 情報通信研究機構、Beyond 5G 研究開発促進事業「超低雑音信号発生技術に基づく 300GHz 帯多値無線通信に関する研究開発」(2021~2023) : 永妻忠夫
17	平川一彦	JST 研究成果展開事業 A-STEP 産学共同 (育成型)「計測システム応用に向けた高速MEMS テラヘルツ・赤外ポロメータの高性能化」(2020~2022) 平川一彦
18	加藤和利	(i) 総務省、SCOPE、「高指向性テラヘルツ波による高セキュリティ無線通信技術の研究開発」(2019~2021)、加藤和利 (ii) JSPS 科研費基盤 A「自由空間電子走行型光電変換デバイスの創生とテラヘルツ波パルスビームの実現」(2020~2022) 加藤和利 (iii) 情報通信研究機構 Beyond 5G 研究開発促進事業シーズ創出型プログラム 「GaN 系真空マイクロフォトンクス技術による無線通信用ハイパワーテラヘルツ波発生に関する研究開発」(2021~2023) 代表機関 : 九州大学
19	谷正彦	福井大学卓越研究者支援(2021)
21	大道英二	村田学術振興財団研究助成 「高 Q 値ウィスパリングギャラリモード共振器を用いたテラヘルツ領域電子スピン共鳴分光法の開発」(2021~2022) 大道 英二

(3) 研究開発成果 (科学技術や社会・経済への波及効果)

研究開発成果の科学技術や社会・経済への貢献についての事例を示す。なお、文中には企業との共同研究の内容も記載している。秘密保持の観点から、企業名、研究期間、企業からの共同研究費を非公開としている。

・01 浅田は、共鳴トンネルダイオード (RTD) について、発振周波数のアップ、高出力化を目指し、square split ring resonator (SRR)、rectangular cavity resonator などの新構造の共振器をもうけた共鳴トンネルダイオード (RTD) テラヘルツ発振器を開発した。また製造プロセスの簡略化による RTD の大規模なアレイ構成を狙い MIM capacitors を用いない新構造の RTD を開発した。

応用面では、swept-source optical coherence tomography (SS-OCT) による物体位置測定システムを RTD と FMBD で構成し、動作を実証した。今後製品検査 (異物検査) などへ応用が期待される。またレーダーについては、FMCW、AMCW の適用についても RTD で検討が進められている。また「Subharmonic Injection による RTD の発振周波数の制御とロックを可能にした。これにより、RTD 発振器の位相制御も可能になるので、出力ビーム方向が可変の RTD フェイズドアレイが期待できる。

・02&23 小川は、ラヘルツ近接アレイセンサの応用として、細菌の薬剤感受性検査装置を企業及び兵庫医科大学と共同開発中である。必要な手続き完了後、機器販売を計画している。

・03 川瀬は、開発した is-TPG を用いた波長走査型の分光分析技術について測定器メーカーと共同研究を実施、共同研究終了後、企業は自社内で製剤中有効成分のモニタリングなどへ

の応用の検討を継続中である。

共同研究グループ（理研）の南出は、テラヘルツ波イメージング用の高繰り返し光注入型テラヘルツ波パラメトリック光源の研究・開発を機器メーカーと実施中。また高出力テラヘルツ波光源の小型化、および応用に関する共同研究についても企業と実施中である。また、JST Impact プログラムで、高効率・高出力（100 キロワット級）テラヘルツ光源とテラヘルツ波検出の高感度検出を開発、これらを組み合わせて非線形 THz 波発生検出による高速危険ガスモニター技術を確立した。今後の社会実装への展開が期待される。

・05 紀和は、ケベック先端科学技術大学院大学（INRS、カナダ）の尾崎恒之教授、カールトン大学（カナダ）の M. C. DeRosa 教授、W.G. Willmore 教授との共同研究により、テラヘルツ波を用いて、1 ミリリットル中に含まれるわずか 10 個の乳がん細胞を高感度に検出することに成功した。カナダのグループが開発したアプタマーと岡山大学の開発した「テラヘルツ波ケミカル顕微鏡」の融合による成果である。新規がんマーカーの開発、新薬の開発に大きく貢献することが期待できる。

また次世代電池電位分布計測装置を企業との産学共同研究により試作機を完成した。開発した装置は、全固体リチウムイオン電池などの内部の電位の様子を動作下で可視化することができる革新的な装置であり、電池開発の期間を大幅に短縮することを可能とするものである。経済産業省戦略的基盤高度化支援事業（事業管理機関：岡山県産業振興財団）により研究開発を継続中である（協和フィンテック株式会社：「次世代電池の開発加速を実現する充放電時の内部電位可視化装置（テラヘルツ波ケミカル顕微鏡）開発」）。

・11 安井は、本技術テーマの研究課題で開発した技術に、マイクロ光コムを導入することにより、オール光型テラヘルツ通信への応用展開を目指し研究を進めている（総務省・委託研究「無線・光相互変換による超高周波数帯大容量通信技術に関する研究開発：光電気相互変換技術」）。移動通信におけるエレクトロニクス限界のパラダイムシフトを引き起こし、移動通信と光通信のシームレス接続を実現可能な、Beyond 5G 技術の創出につながる技術である。

・14 河野は、課題となっていたデバイス作製プロセスを抜本的に改善した自己整合性膜技術により、カーボンナノチューブ膜を用いたテラヘルツカメラパッチシートを開発し、配管の詰まり検査や水道管のリアルタイムモニタリングが可能であることを実証した（<https://www.nature.com/articles/s41467-021-23089-w>）。インフラ設備に組み込んでのビルトインテラヘルツ検査や、人の手やロボットアームに取り付けてのウェアラブル・ポータブルテラヘルツ非破壊検査への展開が期待されている。

・15 伊藤は、本研究課題で開発した FMB ダイオードを逆並列ダイオードペア（AP-FMB ダイオードペア）に適用しテラヘルツ波のサブハーモニックミキシング（SHM）に応用した。SHM では、通常のヘテロダイン検出よりも低い周波数の局部発振器（LO）を使用できるため、低コストで高感度な検出器を実現できる。AP-FMB ダイオードペアとトランスインピーダンスアンプ（TIA）を統合したモジュールは、160 μ W（@150GHz）と非常に低い電力の局部発振器信号を使用し、304GHz の入力信号周波数で 4×10^{-19} W / Hz の極めて低い雑音等価電力を実証した。今後、広帯域・低雑音・低 LO 強度などの特徴を活かしてイメージング、通信などの応用で重要な役割を果たすと期待できる。また、社会実装に適した形態の 128 素子検出器アレイを開発し、他機関と協力して実用的なテラヘルツ波イメージングを実現した。

・16 佐藤は、主要な生分解性ポリマー（PLA、PGA、PHB 等）や汎用ポリマー（PET、Nylon 6 等）についてテラヘルツ領域のスペクトルを測定し、ラマン散乱など他の測定手法を組合せてポリマー構造との相関を明らかにした。これら一連の研究成果は、高分子材料の物性発現、劣化の機構を理解し物性改良や新規材料開発を進める上で大きく貢献することが期待される。

・18 加藤は、熱光学効果ベースのシリカ光学フェイズドアレイ（OPA）チップを開発し、光波の位相の調整可能性を実証した。ヘテロダイン光混合に基づく4つのUTC-PDから生成された300GHzのTHz波は、この位相制御により50°の範囲で連続的にビームをステアリングできることを実証した。出力ビーム方向を任意に変えることが可能であり、通信分野などへの展開が期待できる。

また、共同研究グループである大阪大学（永妻）らは、上記と同様のフォトミキシングによるミリ波発生技術を用いてドローン搭載の超広帯域ミリ波レーダーを企業と共同で開発、工場の煙突内のライニング厚さの点検に使用できることを実証した。ミリ波からテラヘルツ波まで広い波長範囲で可変できるこの技術の特長を生かし、様々な構造物やインフラ設備の診断への適用が期待されている。

・22 大道は、周波数を広い範囲で可変できるフォトミキシング光源を用いることで、テラヘルツ領域の新しい周波数掃引電子スピン共鳴（ESR）分光法を開発した。この装置は非常に小型であり、磁場発生空間内に設置することが可能である。また、高い周波数分解能と広い周波数掃引能力を併せ持っていることから、有機ラジカルや遷移金属酸化物イオンなどのESR分光の強力な手法となるものである。

(4) 主な研究活動 (主要論文、特許、受賞、テレビ、新聞報道等)

① 主要論文

本技術テーマにおける研究開発終了後に発表した論文のうち、研究代表者から回答のあった主要な査読付き論文 (10 報程度まで) を示す。【 】内の記載は、プロジェクトリーダーが主要論文として選定した理由等である。

・ 01 浅田

(i) X. Yu, Y. Suzuki, M. Van Ta, S. Suzuki, and M. Asada, "Highly Efficient Resonant Tunneling Diode Terahertz Oscillator With a Split Ring Resonator," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 42, pp. 982–986 (2021). 【特許出願】 DOI: 10.1109/LED.2021.3082577

(ii) H. Konno, A. Dobroiu, S. Suzuki, M. Asada, and H. Ito, "Discrete Fourier Transform Radar in the Terahertz-Wave Range Based on a Resonant-Tunneling-Diode Oscillator," *Sensors*, vol. 21, 4367 (2021). 【特許出願】 DOI: 10.3390/s21134367

(iii) Mai Ta Van, Yusei Suzuki, Xiongbin Yu, Safumi Suzuki, and Masahiro Asada, "Structure-Simplified Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillator Without Metal-Insulator-Metal Capacitors," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 41, pp. 1498–1507 (2020). 【特許出願】

<https://doi.org/10.1007/s10762-020-00738-7>

(iv) K. Arzi, S. Suzuki, A. Rennings, D. Erni, N. Weimann, M. Asada, and W. Prost, "Subharmonic injection locking for phase and frequency control of RTD-based THz oscillator," *IEEE Trans. THz Sci. and Technol.* vol. 10, pp.221–224 (2020). 【原理実証、国際共同研究成果】 DOI: 10.1109/TTHZ.2019.2959411

(v) K. Kobayashi, S. Suzuki, F. Han, H. Tanaka, H. Fujikata, and M. Asada, "Analysis of a high-power resonant-tunneling-diode terahertz oscillator integrated with a rectangular cavity resonator," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 59, 050907, (2020). 【特許出願】 DOI:10.35848/1347-4065/ab8b40

(vi) K. Kasagi, S. Suzuki, and M. Asada, "Large-scale array of resonant-tunneling-diode terahertz oscillators for high output power at 1 THz," *J. Appl. Phys.*, vol. 125, 151601 (2019). 【世界最高データ】 <https://doi.org/10.1063/1.5051007>

(vii) A. Dobroiu, R. Wakasugi, Y. Shirakawa, S. Suzuki and M. Asada, "Absolute and Precise Terahertz-Wave Radar Based on an Amplitude-Modulated Resonant-Tunneling-Diode Oscillator," *MDPI Photonics*, vol. 52, 5040052 (2018). 【原理実証】

<https://doi.org/10.3390/photonics5040052>

(viii) K. Ogino, S. Suzuki, M. Asada, "Spectral Narrowing of a Varactor-Integrated Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillator by Phase-Locked Loop," *J. Infrared Millimeter Terahz Waves*, vol. 38, pp.1477-1486 (2017). 【原理実証】

<https://doi.org/10.1007/s10762-017-0439-1>

・ 02&23 小川

(i) Keiichiro Shiraga, Mako Urabe, Takeshi Matsui, Shojiro Kikuchi and Yuichi Ogawa, “Highly precise characterization of the hydration state upon thermal denaturation of human serum albumin using a 65 GHz dielectric sensor,” *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 22, 19468 (2020). 【雑誌表紙に採用】 <https://doi.org/10.1039/d0cp02265a>

(ii) Yuichi Ogawa, Shojiro Kikuchi, Yoshihisa Yamashige, Keiichiro Shiraga, Takeshi Mitsunaka, “Near-field sensor array with 65-GHz CMOS oscillators for rapid detection of viable *Escherichia coli*,” *Biosensors and Bioelectronics*, 176, 112935, (2021). 【インパクトファクター (IF:10.618)】 doi: 10.1016/j.bios.2020.112935.

・ 03 川瀬

(i) K. Murate, S. Hayashi, K. Kawase “Expansion of the tuning range of injection-seeded terahertz-wave parametric generator up to 5 THz,” *Applied Physics Express*, vol. 9, No. 8, pp. 082401 (2016). <https://doi.org/10.7567/APEX.9.082401>

(ii) K. Murate, M. Kato, and K. Kawase, “THz spectroscopic imaging of chemicals using is-TPG,” *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, vol. 25, No. 03n04, pp. 1640016, (2016). <https://doi.org/10.1142/S0129156416400164>

(iii) K. Murate, S. Hayashi, K. Kawase, “Multiwavelength terahertz-wave parametric generator for one-pulse spectroscopy,” *Applied Physics Express*, vol. 10, No. 3, pp. 032401 (2017). <https://doi.org/10.7567/APEX.10.032401>

(iv) R. Mitsuhashi, K. Murate, S. Nijima, T. Horiuchi, and K. Kawase, “Terahertz tag identifiable through shielding materials using machine learning,” *Optics Express*, vol 28, issue 3, pp. 3517–3527 (2020). DOI : 10.1364/OE.384195

(v) K. Murate, H. Sakai, and K. Kawase, “Six billion-fold amplification via a two-stage terahertz parametric amplifier,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 10, Issue 2, pp.200–203(2020). DOI: 10.1109/TTHZ.2020.2964832

(vi) H. Sakai, K. Kawase, and K. Murate, “Highly sensitive multi-stage terahertz parametric detector,” *Optics Letters*, Vol. 45, Issue 14, pp. 3905–3908 (2020). DOI: 10.1364/OL.394975

(vii) S. Mine, K. Kawase, K. Murate, “High-power ASE-free fast wavelength-switchable external cavity diode laser,” *Applied Optics*, vol. 60, pp. 1953–1957 (2021). <https://doi.org/10.1364/AO.416033>

(viii) S. Mine, K. Kawase and K. Murate, “Real-time wide dynamic range spectrometer using a rapidly wavelength-switchable terahertz parametric source,” *Optics Letters*, vol. 46, No. 11, pp.2618–2621, (2021). IF 3.714 <https://doi.org/10.1364/OL.423985>

(ix) H. Minamide, K. Nawata, Y. Moriguchi, Y. Takida, and T. Notake, “Injection-seeded terahertz-wave parametric generator with timing stabilized excitation for nondestructive testing applications,” *Rev. Sci. Instrum.*, Volume 92, Issue 9, 093002 (Sep. 2021). 【企業との共著論文】 <https://doi.org/10.1063/5.0057040>

(x) Y. Takida, K. Nawata, and H. Minamide, “Security screening system based on terahertz-wave spectroscopic gas detection,” *Opt. Express*, Vol. 29, Issue 2, pp. 2529-2537, (Jan. 2021). (*equal contribution) 【ImPACT プロジェクトの成果】
<https://doi.org/10.1364/OE.413201>

(xi) Y. Takida, K. Nawata, and H. Minamide, “Injection-seeded backward terahertz-wave parametric oscillator,” *APL Photonics*, Vol. 5, Issue 6, 061301 (Jun. 2020). 【バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の高効率化を達成】
<https://doi.org/10.1063/5.0007306>

(xii) Y. Moriguchi, Y. Tokizane, Y. Takida, K. Nawata, T. Eno, S. Nagano, M. Sato, T. Otsuji, and H. Minamide, “Frequency-agile injection-seeded terahertz-wave parametric generation,” *Opt. Lett.*, Vol. 45, Issue 1, pp. 77-80 (Jan. 2020). 【企業との共著論文】 <https://doi.org/10.1364/OL.45.000077>

(xiii) K. Nawata, Y. Tokizane, Y. Takida, and H. Minamide, “Tunable Backward Terahertz-wave Parametric Oscillation,” *Sci. Rep.*, Vol. 9, 726 (Jan. 2019). 【テラヘルツ波帯のバックワード光パラメトリック発振を実現し、波長可変性を実証】
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-37068-7>

(xiv) Y. Takida, T. Ikee, K. Nawata, Y. Wada, Y. Higashi, and H. Minamide, “Terahertz differential absorption spectroscopy using multifurcated subnanosecond microchip laser,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 115, Issue 12, 121102 (Sep. 2019). 【企業との共著論文】 <https://doi.org/10.1063/1.5119411>

(xv) Y. Moriguchi, Y. Tokizane, Y. Takida, K. Nawata, T. Eno, S. Nagano, and H. Minamide, “High-average and high-peak output-power terahertz-wave generation by optical parametric down-conversion in MgO:LiNbO₃,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 113, 121103 (Sep. 2018). 【企業との共著論文】 <https://doi.org/10.1063/1.5046126>

(xvi) K. Nawata, S. Hayashi, H. Ishizuki, K. Murate, K. Imayama, Y. Takida, V. Yahia, T. Taira, K. Kawase, and H. Minamide, “Effective terahertz wave parametric generation depending on the pump pulse width using a LiNbO₃ crystal,” *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, Vol. 7, Issue 5, pp. 617-620 (Jul. 2017). 【名古屋大学、分子科学研究所の研究チームとの共著論文】 doi: 10.1109/TTHZ.2017.2725479.

(xvii) Y. Takida, K. Nawata, S. Suzuki, M. Asada, and H. Minamide, “Nonlinear optical detection of terahertz-wave radiation from resonant tunneling diodes,” *Opt. Express*, Vol. 25, No. 5, pp. 5389-5396, (Mar. 2017). 【理化学研究所プレスリリース (2017年3月2日), 光波長変換によりテラヘルツ波を高感度に検出—室温で動作するテラヘルツ波領域

の小型非破壊検査装置の実現へー】【Featured in “Advances in Engineering” (Aug. 4, 2017)】 <https://doi.org/10.1364/OE.25.005389>

(xviii) Y. Takida, J. Shikata, K. Nawata, Y. Tokizane, Z. Han, M. Koyama, T. Notake, S. Hayashi, and H. Minamide, “THz-wave parametric gain of stimulated polariton scattering,” *Phys. Rev. A*, Vol. 93, Issue 4, 043836 (Apr. 2016). 【テラヘルツ波発生におけるパラメトリック利得係数を実験的に測定】
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.93.043836>

・ 05 紀和

(i) 清水 雅司, 山中 亮治, 寺西 貴志, 王 璿, 堺 健司, 塚田 啓二, 紀和 利彦, “テラヘルツ波ケミカル顕微鏡を用いた リチウムイオン電池電極のインピーダンス測定法の開発,” *IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines*, Vol. 141, No. 8, pp. 273–278, (2021). <https://doi.org/10.1541/ieejsmas.141.273>

(ii) Feroz Ahmed, Yuichi Yoshida, Jin Wang, Kenji Sakai, and Toshihiko Kiwa, “Design and validation of microfluidic parameters of a microfluidic chip using fluid dynamics,” *AIP Advances*, 11, 075224 (2021). <https://doi.org/10.1063/5.0056597>

(iii) Sharifun Nahar, Ahmed Mohamed, Xavier Ropagnol, Amir Hassanpour, Toshihiko Kiwa, Tsuneyuki Ozaki, Marc A Gauthier, “Non-invasive, label-free, and quantitative monitoring of lipase kinetics using Terahertz emission technology,” *Biotechnology and Bioengineering*, doi: 10.1002/bit.27893, (2021).
<https://doi.org/10.1002/bit.27893>

(iv) E. M. Hassan, A. Mohamed, M. C. DeRos, W. G. Willmore, Y. Hanaoka, T. Kiwa, T. Ozaki, “High-sensitivity detection of metastatic breast cancer cells via Terahertz chemical microscopy using aptamers,” *Sensors & Actuators: B. Chemical*, Vol. 287, pp. 595–601, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.02.019>

(v) 紀和 利彦, 神谷 樹, 飯田 将弘, 井上 博文, 堺 健司, 豊岡 伸一, 塚田 啓二, “テラヘルツ波ケミカル顕微鏡を用いた生体関連物質評価法,” *日本レーザー医学会誌*, 39 巻, 4 号, p. 341–346, (2019). https://doi.org/10.2530/jslsm.jslsm-39_0031

(vi) Toshihiko Kiwa, Tatsuki Kamiya, Taiga Morimoto, Kentaro Fujiwara, Yuki Maeno, Yuki Akiwa, Masahiro Iida, Taihei Kuroda, Kenji Sakai, Hidetoshi Nose, Masaki Kobayashi and Keiji Tsukada, “Imaging of Chemical Reactions Using a Terahertz Chemical Microscope,” *Photonics*, 6 (1), 10, (2019).
<https://doi.org/10.3390/photonics6010010>

(vii) Toshihiko Kiwa, Tatsuki Kamiya, Taiga Morimoto, Kenji Sakai, and Keiji Tsukada, “pH measurements in 16-nL-volume solutions using terahertz chemical microscopy,” *Optics Express*, Vol. 26, Issue 7, pp. 8232–8238, (2018).
<https://doi.org/10.1364/OE.26.008232>

(viii) Takuya Kuwana, Masahiro Ogawa, Kenji Sakai, Toshihiko Kiwa and Keiji Tsukada, "Label-free detection of low-molecular-weight samples using a terahertz chemical microscope," *Applied Physics Express* Vol. 9 No. 4 ,042401 (2016).

DOI:10.7567/APEX.9.042401

・ 06 富永

(i) Feng Zhang, Keisuke Tominaga, Michitoshi Hayashi, Masahiko Tani, "A Quantitative Interpretation for the Difference of Terahertz Spectra of DL- and L-Alanine: Origins of Infrared Intensities in Terahertz Spectroscopy," *J. Phys. Chem. C* (2021). 【出版社からの招待論文】 <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c02854>

(ii) Norifumi Moritsugu, Takafumi Nara, Shin-ichi Koda, Keisuke Tominaga, and Shinji Saito, "Molecular Mechanism of Acceleration and Retardation of Collective Orientation Relaxation of Water Molecules in Aqueous Solutions," *J. Phys. Chem. B.* 124 (51), 11730-11737 (2020). 【出版社からの招待論文】

<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c02854>

(iii) Yu Kadomura, Naoki Yamamoto, Keisuke Tominaga, "Broadband dielectric spectroscopy from sub GHz to THz of hydrated lipid bilayer of DMPC," *Eur. Phys. J. E* 42, 139 (2019). 【出版社からの依頼論文】 <https://doi.org/10.1140/epje/i2019-11901-1>

(iv) Feng Zhang, Houn-Wei Wang, Keisuke Tominaga, Michitoshi Hayashi, Tetsuo Sasaki, "High-resolution THz Spectroscopy and Solid-state Density Functional Theory Calculations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons," *J Infrared Milli Terahz Waves* 41, 1378-1392 (2020). 【出版社からの特集号, Special Issue on Interpretation of Solid-State Terahertz Spectra への招待論文】 DOI: 10.1007/s10762-019-00621-0

・ 07&19 永井

(i) K. Kawase, M. Nagai, K. Furukawa, M. Fujimoto, R. Kato, Y. Honda, and G. Isoyama, "Extremely high-intensity operation of a THz free-electron laser using an electron beam with a higher bunch charge," *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A* 960 163582, (2020). 【google での被引用数 12】 doi:10.1016/j.nima.2020.163582

(ii) M. Tsubouchi, H. Hoshina, M. Nagai and G. Isoyama, "Plane photoacoustic wave generation in liquid water using irradiation of terahertz pulses," *Scientific Reports* 10, 18537 (2020). 【google での被引用数 9】

<https://doi.org/10.1038/s41598-020-75337-6>

・ 08 平山

(i) T. T. Lin, L. Wang, K. Wang, and H. Hirayama "Development of High Power Terahertz Quantum Cascade Lasers by Reducing Leakage Current using Non-Equilibrium Green's Function Method," *The Review of Laser Engineering* 48,250-254 (2020).

(ii) J. Yun, D. P. Han, and H. Hirayama, "Random electric field induced by interface roughness in GaN/Al_xGa_{1-x}N multiple quantum wells," *Applied Physics Express*, Vol. 12,

No. 12, pp. 124005–1–6, November 21, (2019). DOI:10.7567/1882–0786/ab548a

(iii) S. Fujikawa, T. Ishiguro, K. Wang, W. Terashima, H. Fujishiro and H. Hirayama, “Evaluation of GaN/AlGaN THz quantum-cascade laser epi-layers grown on AlGaIn/Si templates by MOCVD,” *Journal of Crystal Growth*, vol. 510, pp. 47–49, (2019).

<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.12.027>

(iv) L. Wang, T. T. Lin, K. Wang, T. Grange, S. Birner and H. Hirayama, “Short-period scattering-assisted terahertz quantum cascade lasers operating at high temperatures,” *Scientific Reports*, Vol. 9, No. 9446, July 1, 2019.

DOI: 10.1038/s41598–019–45957–8

(v) L. Wang, T. T. Lin, K. Wang, and H. Hirayama, “Parasitic transport paths in two-well scattering-assisted terahertz quantum cascade lasers,” *Applied Physics Express*, Vol. 12, No. 8, pp. 082003–1–5, July 9, 2019.

DOI:10.7567/1882–0786/ab2b56

(vi) T. T. Lin, L. Wang, K. Wang, T. Grange and H. Hirayama, “Optimization of terahertz quantum cascade lasers by suppressing carrier leakage channel via high-energy state,” *Applied Physics Express*, Vol. 11, No. 11, pp. 112702–1–5, October 4, (2018).

DOI:107567/APEX.11.112702

(vii) T. T. Lin, K. Wang, L. Wang, and H. Hirayama, “High output power THz quantum cascade lasers and their temperature dependent performance,” *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 37, No. 5, pp. 513–522, October, (2018).

DOI:10.11972/j.issn.1001–9014.2018.05.001

(viii) K. Wang, T. Grange, T. T. Lin, L. Wang, Z. Jehn, S. Birner, J. Yun, W. Terashima and H. Hirayama, “Broadening mechanisms and self-consistent gain calculations for GaN quantum cascade laser structures,” *Applied Physics Letters*, Vol. 113, No. 6, pp. 061109–1–5, August 10, (2018).

DOI: 10.1063/1.5029520

(ix) K. Wang, T. T. Lin, L. Wang, W. Terashima and H. Hirayama, “Controlling loss of waveguides for potential GaN terahertz quantum cascade lasers by tuning the plasma frequency of doped layers,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 57, No. 8, pp. 081001–1–5, July 24, (2018). DOI:10.7567/JJAP.57.081001

(x) T. Lin and H. Hirayama, “Variable Barrier Height AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Laser Operating at 3.7 THz,” *physica status solidi (a)*, pp. 1700424, (2017).

<https://doi.org/10.1002/pssa.201700424>

・ 09 廣本

(i) D. Samanta, Karthikeyan MP, A. Banerjee, H. Inokawa, “Tunable graphene nano-patch antenna design for on-chip integrated terahertz detector arrays with potential

application in cancer imaging,” *Nanomedicine*, Vol. 16, No. 12, p. 1035 (2021) 【IF: 4.300】 <https://doi.org/10.2217/nnm-2020-0386>

(ii) D. Elamaran, Y. Suzuki, H. Satoh, A. Banerjee, N. Hiromoto, H. Inokawa, “Performance Comparison of SOI-Based Temperature Sensors for Room-Temperature Terahertz Antenna-Coupled Bolometers: MOSFET, PN Junction Diode and Resistor,” *Micromachines*, Vol. 11, No. 8, p. 718 (2020) 【企業との共同研究成果】
<https://doi.org/10.3390/mi11080718>

(iii) A. Banerjee, H. Satoh, D. Elamaran, Y. Sharma, N. Hiromoto, H. Inokawa, “Performance improvement of on-chip integrable terahertz microbolometer arrays using nanoscale meander titanium thermistor,” *J. Appl. Phys.*, Vol. 125, No. 21, p. 214502 (2019) 【新理論の提唱】
<https://doi.org/10.1063/1.5083643>

(iv) D. Elamaran, H. Satoh, N. Hiromoto, H. Inokawa, “Investigation of silicon-on-insulator CMOS integrated thermocouple and heater for antenna-coupled bolometer,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 58, p. SDDE08 (2019) 【企業との共同研究成果】
<https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab12c4>

(v) A. Banerjee, H. Satoh, D. Elamaran, Y. Sharma, N. Hiromoto, H. Inokawa, “Optimization of narrow width effect on titanium thermistor in uncooled antenna-coupled terahertz microbolometer,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 57, No. 4S, p. 04FC09 (2018)
DOI:10.7567/JJAP.57.04FC09

(vi) A. Banerjee, H. Satoh, Y. Sharma, N. Hiromoto, H. Inokawa, “Characterization of platinum and titanium thermistors for terahertz antenna-coupled bolometer applications,” *Sensors and Actuators: A Physical*, Vol. 273, p. 49 (2018)
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.02.014>

(vii) A. Banerjee, H. Satoh, A. Tiwari, C. Apriono, E. T. Rahardjo, N. Hiromoto, H. Inokawa, “Width dependence of platinum and titanium thermistor characteristics for application in room-temperature antenna-coupled terahertz microbolometer,” *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 56, No. 4S, p. 04CC07 (2017) 【被引用数 17 件】
<https://doi.org/10.7567/JJAP.56.04CC07>

(viii) A. Tiwari, H. Satoh, M. Aoki, M. Takeda, N. Hiromoto, H. Inokawa, “THz Antenna-Coupled Microbolometer with 0.1- μm -wide Titanium Thermistor,” *International Journal of ChemTech Research*, Vol. 7, No. 2, p. 1019 (2015).

(ix) A. Tiwari, H. Satoh, M. Aoki, M. Takeda, N. Hiromoto, H. Inokawa, “Fabrication and analytical modeling of integrated heater and thermistor for antenna-coupled bolometers,” *Sensors and Actuators: A Physical*, Vol. 222, p. 160 (2015)
DOI: 10.1016/j.sna.2014.10.003

・ 10 保科

(i) H. Hoshina, Y. Iwasaki, E. Katahira, M. Okamoto, G. Otani “Structure and dynamics of bound water in poly (ethylene-vinylalcohol) copolymers studied by terahertz spectroscopy,” *Polymer*, 148, pp. 49-60 (2018). 【企業との共同研究】
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.06.020>

(ii) Hiromichi Hoshina, Yuichi Saito, Takumi Furuhashi, Tomomi Shimazaki, Manabu Sawada, Yasunori Hioki, Chiko Otani “Terahertz Spectroscopy for Characterization of Hydrogen Bonding and Cross-linked Structure Dynamics in Polyurethane,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 41, pp.265-275 (2020). 【企業との共同研究】
<https://doi.org/10.1007/s10762-019-00667-0>

・ 11 安井

(i) Takeo Minamikawa, Kenta Hayashi, Tatsuya Mizuguchi, Yi-Da Hsieh, Dahi Ghareab Abdelsalam, Yasuhiro Mizutani, Hirotsugu Yamamoto, Tetsuo Iwata, and Takeshi Yasui, “Real-time determination of absolute frequency in continuous-wave terahertz radiation with a photocarrier terahertz frequency comb induced by an unstabilized femtosecond laser,” *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Vol. 37, Issue 5, pp. 473-485(2016). 【その他（非制御レーザーの利用）】
DOI:10.1007/s10762-015-0237-6

(ii) Yi-Da Hsieh, Hiroto Kimura, Kenta Hayashi, Takeo Minamikawa, Yasuhiro Mizutani, Hirotsugu Yamamoto, Tetsuo Iwata, Hajime Inaba, Kaoru Minoshima, Francis Hindle, and Takeshi Yasui, “Terahertz frequency-domain spectroscopy of low-pressure acetonitrile gas by a photomixing terahertz synthesizer referenced to dual optical frequency combs,” *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Vol. 37, Issue 9, pp. 903-915(2016). 【光コム参照型 THz シンセサイザーの分光応用】
<https://doi.org/10.1007/s10762-016-0277-6>

(iii) Yi-Da Hsieh, Shota Nakamura, Dahi Ghareab Abdelsalam, Takeo Minamikawa, Yasuhiro Mizutani, Hirotsugu Yamamoto, Tetsuo Iwata, Francis Hindle, and Takeshi Yasui, “Dynamic terahertz spectroscopy of gas molecules mixed with unwanted aerosol under atmospheric pressure using fibre-based asynchronous-optical-sampling terahertz time-domain spectroscopy,” *Sci. Rep.* 6, 28114 (2016). 【プレスリリース (2016/6/15、1件)】 【インパクトファクター (IF:4.379)】 <https://doi.org/10.1038/srep28114>

(iv) Guoqing Hu, Tatsuya Mizuguchi, Xin Zhao, Takeo Minamikawa, Takahiko Mizuno, Yuli Yang, Cui Li, Ming Bai, Zheng Zheng, Takeshi Yasui, “Measurement of absolute frequency of continuous-wave terahertz radiation in real time using a free-running, dual-wavelength mode-locked, erbium-doped fibre laser,” *Sci. Rep.*, Vol. 7, 42082 (2017). <https://doi.org/10.1038/srep42082>

(v) Guoqing Hu, Tatsuya Mizuguchi, Ryo Oe, Kazuki Nitta, Xin Zhao, Takeo Minamikawa, Ting Li, Zheng Zheng, and Takeshi Yasui, “Dual terahertz comb spectroscopy with a single free-running fibre laser,” *Sci. Rep.*, Vol. 8, art. 11155 (2018). 【インパクトファク

ター (IF:4.379)】 <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29403-9>

(vi) Jie Chen, Kazuki Nitta, Xin Zhao, Takahiko Mizuno, Takeo Minamikawa, Francis Hindle, Zheng Zheng, and Takeshi Yasui, "Adaptive-sampling near-Doppler-limited terahertz dual-comb spectroscopy with a free-running single-cavity fiber laser," *Adv. Photon.* Vol. 2, Issue 3, art. 036004 (2020). 【表紙採用】【プレスリリース (2020/5/27、1件)】 <https://doi.org/10.1117/1.AP.2.3.036004>

・ 12 山下

(i) S. Ikeda, C. Otani, and M. Yamashita, "Hot carrier dynamics and electron-optical phonon coupling in photoexcited graphene via time-resolved ultrabroadband terahertz spectroscopy," *Phys. Rev. Research* 3, 043143 (2021) (選定理由: グラフェンのホットキャリアダイナミクスに関する成果) <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.043143>

(ii) M. Yamashita and C. Otani, "Intrinsic and extrinsic effects on intraband optical conductivity of hot carriers in photoexcited graphene," *Phys. Rev. Res.* 3, 013150 (2021). (選定理由: グラフェンのホットキャリアダイナミクスに関する成果) <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.013150>

(iii) P. Tapsanit, M. Yamashita, C. Otani, S. Krongsuk, C. Ruttanpun, "Closed-form formulae of effective parameters of hyperbolic metamaterial made by stacked hole-array layers working at terahertz or microwave radiation," *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 34, No. 9, pp. 1930-1936 (2017). (選定理由: IF 2.106) DOI:10.1364/JOSAB.34.001930

(iv) H. Suzuki, M. Ishida, M. Yamashita, C. Otani, K. Kawachi, Y. Kasama, E. Kwon, "Rotational dynamics of Li⁺ ions encapsulated in C60 cages at low temperatures," *Phys. Chem. Chem. Phys.* 18, 31384-31387 (2016). (選定理由: IF 3.676) DOI: 10.1039/c6cp06949e

(v) P. Tapsanit, M. Yamashita, C. Otani, T. Ishihara, and C. Otani, "Quasi-analytical solutions of hybrid platform and the optimization of highly sensitive thin-film sensors for terahertz radiation," *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 33, No. 12, pp. 2535-2544 (2016). (選定理由: IF 2.106) <https://doi.org/10.1364/JOSAB.33.002535>

・ 13 渡邊

(i) J. Hirata, N. Kurokawa, M. Okano, A. Hotta, and S. Watanabe, "Evaluation of crystallinity and hydrogen bond formation in stereocomplex poly(lactic acid) films by terahertz time-domain spectroscopy," *Macromolecules* 53 (16), pp. 7171-7177 (2020). 【IF=5.99, 高分子物性の新物理現象 (結晶化に伴うテラヘルツスペクトルシフト) の発見】 <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.0c00237>

(ii) K. Xu, E. Bayati, K. Oguchi, S. Watanabe, D. P. Winebrenner, and M. H. Arbab, "Terahertz time-domain polarimetry (THz-TDP) based on the spinning E-0 sampling technique: determination of precision and calibration," *Opt. Express* 28 (9), pp. 13482-13496 (2020). 【IF=3.89, テラヘルツ偏光計測がシーズとなった国際共同研究成果】

<https://doi.org/10.1364/OE.389651>

(iii) M. Nakamura, M. Okano, and S. Watanabe, "Real-Time Monitoring of Structural Changes in Poly(lactic acid) during Thermal Treatment by High-Speed Terahertz Time-Domain Spectroscopy For Nondestructive Inspection." *ACS Appl. Polym. Mater.* 1 (11), pp. 3008–3016 (2019). 【IF=4.09, テラヘルツ計測による高分子の結晶化モニタリング】
<https://doi.org/10.1021/acsapm.9b00703>

・ 14 河野

(i) Kou Li, Ryoichi Yuasa, Ryogo Utaki, Meiling Sun, Yu Tokumoto, Daichi Suzuki, and Yukio Kawano, "Robot-assisted, source-camera-coupled multi-view broadband imagers for ubiquitous sensing platform," *Nature Communications* 12, 3009 (2021). (IF: 14.9)
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-23089-w>

(ii) Daichi Suzuki, Kou Li, Koji Ishibashi, and Yukio Kawano, "A terahertz video camera patch sheet with an adjustable design based on self-aligned, 2D, suspended sensor array patterning," *Advanced Functional Materials* 31, 2008931 (2021). (IF: 18.8)
<https://doi.org/10.1002/adfm.202008931>

(iii) Kou Li, Daichi Suzuki, and Yukio Kawano, "Series Photothermoelectric Coupling Between Two Composite Materials for a Freely Attachable Broadband Imaging Sheet," *Advanced Photonics Research* 2, 2000095 (2021).
<https://doi.org/10.1002/adpr.202000095>

(iv) Suzuki, T. Okamoto, J. Li, Y. Ito, T. Fujita, and Y. Kawano, "Terahertz and Infrared Response Assisted by Heat Localization in Nanoporous Graphene Carbon," 173, 403–409 (2021). (IF: 9.5) <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.10.059>

(v) D. Suzuki and Y. Kawano, "Flexible terahertz imaging systems with single-walled carbon nanotube films," *Carbon* 162, 13–24 (2020). (IF: 9.5)
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.01.113>

(vi) Takuya Okamoto, Naoki Fujimura, Luca Crespi, Tetsuo Kodera, and Yukio Kawano, "Terahertz detection with an antenna-coupled highly-doped silicon quantum dot," *Scientific Reports* 9, 18574–1–6 (2019). (IF: 4.3)
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-54130-0>

(vii) X. Deng, L. Li, M. Enomoto, and Y. Kawano, "Continuously Frequency-Tuneable Plasmonic Structures for Terahertz Bio-sensing and Spectroscopy," *Scientific Reports* 9, 3498–1–9 (2019). (IF: 4.3) Selected for the top 100 physics *Scientific Reports* papers in 2019 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39015-6>

(viii) D. Suzuki, Y. Ochiai, Y. Nakagawa, Y. Kuwahara, T. Saito, and Y. Kawano, "Fermi-level-controlled semiconducting-separated carbon nanotube films for flexible terahertz imagers," *ACS Applied Nano Materials* 1, 2469–2475 (2018). (IF: 5.0)

<https://doi.org/10.1021/acsanm.8b00421>

(ix) D. Suzuki, Y. Ochiai, and Y. Kawano, "Thermal device design for a carbon nanotube terahertz camera," *ACS Omega* 3, 3540-3547 (2018).
<https://doi.org/10.1021/acsomega.7b02032>

(x) T. Iguchi, T. Sugaya, and Y. Kawano, "Silicon-immersed terahertz plasmonic structures," *Applied Physics Letters* 110, 151105-1-4 (2017).
<https://doi.org/10.1063/1.4980018>

・ 15 伊藤

(i) H. Ito and T. Ishibashi, "Low-Local-Oscillator-Power Sub-Harmonic Mixing in 300-GHz Band by Fermi-Level Managed Barrier Diode," *Electron. Lett.* 56, No. 24, pp. 1326-1328 (2020). <http://dx.doi.org/10.1049/el.2020.2307>

(ii) H. Ito and T. Ishibashi, "Low-Noise Sub-Harmonic-Mixing in 300-GHz Band by Fermi-Level Managed Barrier Diode," *Appl. Phys. Express* 14, No. 10, pp. 104001-1 - 104001-4 (2021). <https://doi.org/10.35848/1882-0786/ac2213>

・ 16 佐藤

(i) Atsushi Nishimae, Harumi Sato, "Study of Co-crystallization and Intermolecular Hydrogen Bondings of Poly(glycolide-co-L-lactide) Copolymers by Terahertz and Low-Frequency Raman Spectroscopy," *Macromolecules* 54, 6440-6448 (2021).
<https://doi.org/10.1021/acs.macromol.1c00561>

(ii) Yumiko Yamamoto, Hiromichi Hoshina, Harumi Sato*, "Differences in Intermolecular Interactions and Flexibility between Poly(ethylene terephthalate) and Poly(butylene terephthalate) Studied by Far-Infrared/Terahertz and Low-Frequency Raman Spectroscopy," *Macromolecules*, 54, 2, 1052-1062 (2021).
<https://doi.org/10.1021/acs.macromol.0c02049>

(iii) Dian Marlina, Yeonju Park, Hiromichi Hoshina, Yukihiro Ozaki, Young Mee Jung*, Harumi Sato*, "A study on blend ratio-dependent far-IR and low-frequency Raman spectra and WAXD patterns of poly(3-hydroxybutyrate)/poly(4-vinylphenol) using homospectral and heterospectral two-dimensional correlation spectroscopy," *Analytical Science*, 36, 731-737 (2020). <https://doi.org/10.2116/analsci.19p428>

(iv) Dian Marlina, Hiromichi Hoshina, Yukihiro Ozaki, Harumi Sato*, "Crystallization and crystalline dynamics of poly(3-hydroxybutyrate) / poly(4-vinylphenol) polymer blends studied by low-frequency vibrational spectroscopy," *Polymer*, 181, 121790 (2019). DOI:10.1016/j.polymer.2019.121790

(v) Shigeki Yamamoto, Erika Ohnishi, Harumi Sato, Hiromichi Hoshina, Daitaro Ishikawa, and Yukihiro Ozaki, "Low-Frequency Vibrational Modes of Nylon 6 Studied by Using Infrared and Raman Spectroscopies and Density Functional Theory Calculations," *J. Phys.*

Chem. B, 123, 5368–5376 (2019). <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b04347>

(vi) Fumita Nishimura, Hiromichi Hoshina, Yukihiro Ozaki and Harumi Sato*, “Isothermal crystallization of poly(glycolic acid) studied by terahertz and infrared spectroscopy and SAXS/WAXD simultaneous measurements,” *Polymer J.*, 51, 237–245 (2019).
<https://doi.org/10.1038/s41428-018-0150-7>

(vii) Seika Tatsuoka, Harumi Sato, “Stress-induced crystal transition of poly(butylene succinate) studied by terahertz and low-frequency Raman spectroscopy and quantum chemical calculation,” *Spectrochimica Acta Part A*, 197, 95–102 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.01.040>

(viii) Chihiro Funaki, Shigeki Yamamoto, Hiromichi Hoshina, Yukihiro Ozaki, Harumi Sato, “Three different kinds of weak C–H···O=C inter- and intramolecular interactions in poly(ϵ -caprolactone) studied by using terahertz spectroscopy, infrared spectroscopy and quantum chemical calculations,” *Polymer*, 137, 245–254 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.01.025>

(ix) Dian Marlina, Harumi Sato, Hiromichi Hoshina, Yukihiro Ozaki, “Intermolecular Interactions of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (P(HB-co-HV)) with PHB-Type Crystal Structure and PHV-Type Crystal Structure Studied by Low-Frequency Raman and Terahertz Spectroscopies,” *Polymer*, 135, 331–337 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.12.030>

(x) Hotsumi Iwasaki, Madoka Nakamura, Nozomu Komatsubara, Makoto Okano, Masayoshi Nakasako, Harumi Sato, Shinichi Watanabe, “Controlled Terahertz Birefringence in Stretched Poly(lactic acid) Films Investigated by Terahertz Time-Domain Spectroscopy and Wide-Angle X-ray Scattering,” *J. Phys. Chem. B*, 121 (28), 6951–6957 (2017).
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b04755>

・ 17 平川

(i) B. Qiu, Y. Zhang, N. Nagai, and K. Hirakawa, “Enhancing the thermal responsivity of microelectromechanical system beam resonators by preloading a critical buckling strain,” *Applied Physics Letters*, vol. 119, pp. 153502–1~5 (2021) 【IF=3.791】
<https://doi.org/10.1063/5.0065800>

(ii) T. Niu, N. Morais, B. Qiu, N. Nagai, Y. Zhang, Y. Arakawa, and K. Hirakawa, “GaAs-based microelectromechanical terahertz bolometers fabricated on high-resistivity Si substrates using wafer bonding technique,” *Journal of Applied Physics*, vol. 119, pp. 041104–1~5 (2021). 【IF=3.791】
<https://doi.org/10.1063/5.0058260>

(iii) T. Niu, B. Qiu, Y. Zhang, and K. Hirakawa, “Control of absorption properties of ultra-thin metal-insulator-metal metamaterial terahertz absorbers,” *Japanese Journal of Applied Physics*, 59, 120904 (2020)

<http://dx.doi.org/10.35848/1347-4065/abc925>

(iv) B. Qiu, Y. Zhang, K. Akahane, N. Nagai, and K. Hiraoka, "Effect of beam deflection on the thermal responsivity of GaAs-based doubly clamped microelectromechanical beam resonators," *Applied Physics Letters* Volume 117, Issue 20, (2020) 【IF=3.791】
<https://doi.org/10.1063/5.0029188>

(v) Y. Zhang, R. Kondo, B. Qiu, X. Liu, and K. Hiraoka, "Giant Enhancement in the Thermal Responsivity of Microelectromechanical Resonators by Internal Mode Coupling," *Phys. Rev. Applied* 14, 014019, (2020) 【IF=4.985】
<https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.014019>

(vi) I. Morohashi, Y. Zhang, B. Qiu, Y. Irimajiri, N. Sekine, K. Hiraoka and I. Hosako, "Rapid Scan THz Imaging Using MEMS Bolometers," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, volume 41, pages675-684(2020), (2020) 【共同研究の成果】
<https://doi.org/10.1007/s10762-020-00691-5>

(vii) Y. Zhang, Y. Yoshioka, M. Iimori, B. Qiu, X. Liu and K. Hiraoka: "Thermal tuning of mechanical nonlinearity in GaAs doubly-clamped MEMS beam resonators," *Applied Physics Letters*, Vol. 119, Issue 16, pp. 163503-1~5 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.006556271>, 【JOURNAL IMPACT FACTOR: 3.791 (Applied Physics Letters).】 <https://doi.org/10.1063/5.0065271>

(viii) T. Niu, B. Qiu, Y. Zhang, and K. Hiraoka, "Effects of substrate phonon absorption on the resonance behavior of metal-insulator-metal metamaterial terahertz absorbers," *Jpn. J. Appl. Phys.* 59 120904 (2021). 【JOURNAL IMPACT FACTOR: 2.895 (Applied Physics Express)】 <https://doi.org/10.35848/1882-0786/ac3bd8>

・ 18 加藤

(i) Ming Che, Yuki Matsuo, Haruichi Kanaya, Hiroshi Ito, Tadao Ishibashi, Kazutoshi Kato, "Optoelectronic THz-Wave Beam Steering by Arrayed Photomixers With Integrated Antennas," *IEEE Photonics Technology Letters*, VOL. 32, NO. 16, pp. 979-982, 2020/2 【インパクトファクター (IF : 2.5)】 <https://doi.org/10.1109/LPT.2020.3007415>

(ii) Ming Che, Haruichi Kanaya, Kazutoshi Kato, "Optically controlled THz power tuning based on interference at transmission line," *OPTICS EXPRESS*, Vol. 29, No. 13, 20043, 2021/6 【インパクトファクター (IF : 3.9)】 <https://doi.org/10.1364/OE.423308>

・ 20 谷

(i) A. I. Shugurov, E. A. Mashkovich, S. B. Bodrov, M. Tani, and M. I. Bakunov: "Nonellipsometric electro-optic sampling of terahertz waves in GaAs," *Optics Express*, Vol. 26, No. 18, pp. 23359-23365 (2018). 【IF: 3.894】
<https://doi.org/10.1364/OE.26.023359>

(ii) Dazhi Li, Makoto Nakajima, Masahiko Tani, Jinfeng Yang, Hideaki Kitahara, Masaki

Hashida, Makoto Asakawa, Wenxin Liu, Yanyu Wei and Ziqiang Yang: "Terahertz Radiation from Combined Metallic Slit Arrays," *Scientific Reports* Vol.9, Article No. 6804 (8 pages) (2019). 【IF: 4.379】

<https://doi.org/10.1038/s41598-019-43072-2>

(iii) Zhuoheng Zhong, Takashi Furuya, Kimitaka Ueno, Hisateru Yamaguchi, Keisuke Hitachi, Kunihiro Tsuchida, Masahiko Tani, Jingkui Tian and Setsuko Komatsu: "Proteomic Analysis of Irradiation with Millimeter Waves on Soybean Growth under Flooding Conditions," *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 21, Paper No. 486 (22 pages) (2020). 【IF: 5.923】 <https://doi.org/10.3390/ijms21020486>

(iv) Dmitry S. Bulgarevich, Yusuke Akamine, Miezal Talara, Valynn Mag-usara, Hideaki Kitahara, Hiroyuki Kato, Masaki Shiihara, Masahiko Tani, Makoto Watanabe: "Terahertz Magneto-Optic Sensor/Imager," *Scientific Report*, Vol.10, Paper No. 1158 (2020). 【IF: 4.379】 <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58085-5>

(v) Fumiyoshi Kuwashima, Mona Jarrahi, Semih Cakmakyapan, Osamu Morikawa, Takuya Shirao, Kazuyuki Iwao, Kazuyoshi Kurihara, Hideaki Kitahara, Takashi Furuya, Kenji Wada, Makoto Nakajima, Masahiko Tani, "Evaluation of high-stability optical beats in laser chaos by plasmonic photomixing," *Optics Express*, 28, 24833-24844 (2020). 【IF: 3.894】 DOI: 10.1364/OE.399743

(vi) Takayasu Kawasaki, Yuusuke Yamaguchi, Tomomi Ueda, Yuya Ishikawa, Toyonari Yaji, Toshiaki Ohta, Koichi Tsukiyama, Toshitaka Idehara, Masatoshi Saiki, and Masahiko Tani, "Irradiation effect of a submillimeter wave from 420 GHz gyrotron on amyloid peptides in vitro," *Biomedical Optics Express*, 11, 5341-5351 (Published: 31 Aug 2020). 【IF: 3.921】 DOI: 10.1364/BOE.395218

(vii) Jessica Afalla, Alexander De Los Reyes, Neil Irvin Cabello, Victor DC Andres Vistro, Maria Angela Faustino, John Paul Ferrolino, Elizabeth Ann Prieto, Hannah Bardolaza, Gerald Angelo R. Catindig, Karl Cedric Gonzales, Valynn Katrine Mag-usara, Hideaki Kitahara, Armando S. Somintac, Arnel A. Salvador, Masahiko Tani, and Elmer S. Estacio, "A modulation-doped heterostructure-based terahertz photoconductive antenna emitter with recessed metal contacts," *Scientific Reports*, 10, 19926 (9 pages) (2020). 【IF: 4.379】 DOI: 10.1038/s41598-020-76413-7

(viii) Dmitry S. Bulgarevich, Miezal Talara, Masahiko Tani, Makoto Watanabe, "Machine learning for pattern and waveform recognitions in terahertz image data," *Scientific Reports*, 11, 1251 (8 pages) (2021). 【IF: 4.379】 DOI: 10.1038/s41598-020-80761-9

(ix) Maya Mizuno, Hideaki Kitahara, Kensuke Sasaki, Masahiko Tani, Masami Kojima, Yukihisa Suzuki, Takafumi Tasaki, Yoshinoroi Tatematsu, Msafumi Fukunari, Kanako Wake, "Dielectric property measurements of corneal tissues for computational dosimetry of eye in terahertz band in vivo and in vitro," *Biomedical Optics Express*, 12, 1295-1307 (2021) 【IF: 3.921】 <https://doi.org/10.1364/BOE.412769>

・ 21 梶原

(i) Kuan-Ting Lin, Hirofumi Nema, Qianchun Weng, Sunmi Kim, Kenta Sugawara, Taiichi Otsuji, Susumu Komiyama, Yusuke Kajihara, "Nanoscale probing of thermally excited evanescent fields in an electrically biased graphene by near-field optical microscopy," *Applied Physics Express*, 13, 9, 96501 (2020). <https://doi.org/10.35848/1882-0786/abae0a>

(ii) Yusuke Kajihara, Yuta Kanehara, Kuan-TingLin, Susumu Komiyama, "Laser-assisted tip positioning for thermal near-field microscopy," *Infrared Physics & Technology*, 103917 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103917>

・ 22 大道

(i) Eiji Ohmichi, Yuto Shoji, Hideyuki Takahashi, and Hitoshi Ohta, " Frequency-domain electron spin resonance spectroscopy using continuously frequency-tunable terahertz photomixers," *Applied Physics Letters* 119 162404/1-5 (2021). <https://doi.org/10.1063/5.0065649>

・ 24 坪内

(i) Masaaki Tsubouchi, Hiromichi Hoshina, Masaya Nagai, and Goro Isoyama, "Plane photoacoustic wave generation in liquid water using irradiation of terahertz pulses," *Scientific Reports*, 10, 18537 (2020). 【プレス 2020年10月28日】
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-75337-6>

(ii) Shota Yamazaki, Masahiko Harata, Yuya Ueno, Masaaki Tsubouchi, Keiji Konagaya, Yuichi Ogawa, Goro Isoyama, Chiko Otani and Hiromichi Hoshina, "Propagation of THz irradiation energy through aqueous layers: Demolition of actin filaments in living cells," *Scientific Reports*, 10, 9008 (2020). 【プレス 2020年6月2日】
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-65955-5>

(iii) Masaaki Tsubouchi and Keisuke Nagashima, "High-speed terahertz color imaging using 100 kHz line scan camera" , *Optics Express*, 28. 17820-17831 (2020).
<https://doi.org/10.1364/OE.394312>

② 特許

本技術テーマにおける研究開発終了後の特許出願、特許登録を示す。

・ 01 浅田

(i) 及び (ii) 未公開国内出願 2件

(iii) 【発明の名称】サブキャリア変調方式テラヘルツレーダー
【出願番号】特願 2019-232617 (P2019-232617)
【出願日】令和1年12月24日 (2019. 12. 24)
【公開番号】特開 2021-101167 (P2021-101167A)
【公開日】令和3年7月8日 (2021. 7. 8)
【出願人】国立大学法人東京工業大学

(iv) 【発明の名称】高出力テラヘルツ発振器
【出願番号】特願 2018-216285 (P2018-216285)
【出願日】平成30年11月19日 (2018. 11. 19)
【公開番号】特開 2020-88466 (P2020-88466A)
【公開日】令和2年6月4日 (2020. 6. 4)
【出願人】国立大学法人東京工業大学

(v) 【発明の名称 EN】 TERAHERTZ OSCILLATOR AND METHOD FOR MANUFACTURING SAME
【発明の名称 JA】 テラヘルツ発振器及びその製造方法
【国際出願番号】 PCT/JP2021/000069
【国際出願日】 2021. 02. 05
【国際公開番号】 WO/2021/171787
【国際公開日】 2021. 09. 02
【優先権情報】 2020-030428 (2020. 02. 26) JP
【移行に関する情報】 なし
【出願人】 国立大学法人東京工業大学

(vi) 【発明の名称 EN】 HIGH-OUTPUT TERAHERTZ OSCILLATOR
【発明の名称 JA】 高出力テラヘルツ発振器
【国際出願番号】 PCT/JP2019/045251
【国際出願日】 2019. 11. 19
【国際公開番号】 WO/2020/105627
【国際公開日】 2020. 05. 28
【優先権情報】 2018-216285 (2018. 11. 19) JP
【移行に関する情報】 アメリカ合衆国 17290811 (2021. 05. 03)
【出願人】 国立大学法人東京工業大学

・ 02 小川

未公開国内出願 4件

【米国出願番号】 US201816637774
【米国出願日】 2018. 07. 30
【米国公開番号】 US2020183251 (A1)
【米国公開日】 2020-06-11
【優先権情報】 JP2017-155165 (2017. 08. 10) ; W02018JP28453 (2018. 07. 30)
【出願人】「企業」
国立研究開発法人理化学研究所

- (v) 【発明の名称】 テラヘルツ波生成装置、光パラメトリック増幅器、テラヘルツ波検出器、および非線形光学素子
【出願番号】 特願 2016-192374 (P2016-192374)
【出願日】 平成 28 年 9 月 30 日 (2016. 9. 30)
【出願人】 国立研究開発法人理化学研究所
【登録番号】 特許第 6810954 号
【登録日】 令和 2 年 12 月 16 日 (2020. 12. 16)

・ 04 水津

- (i) 【発明の名称】 測定システム
【出願番号】 特願 2018-56514
【出願日】 平成 30 年 3 月 23 日 (2018. 3. 23)
【公開番号】 特開 2019-168335
【公開日】 令和 1 年 10 月 3 日 (2019. 10. 3)
【審査請求日】 令和 2 年 12 月 11 日 (2020. 12. 11)
【出願人】 学校法人千葉工業大学

・ 08 平山

- (i) 及び (ii) 未公開国内出願 2 件
- (iii) 【発明の名称】 窒化物半導体量子カスケードレーザー
【出願番号】 特願 2015-148786
【出願日】 平成 27 年 7 月 28 日 (2015. 7. 28)
【出願人】 国立研究開発法人理化学研究所
【登録番号】 特許第 6627309 号
【登録日】 令和 1 年 12 月 13 日 (2019. 12. 13)
- (iv) 【発明の名称 EN】 Nitride semiconductor quantum cascade laser
【米国特許番号】 US9368938 (B2)
【特許登録日】 2016. 06. 14
【米国出願番号】 US201514823686
【米国出願日】 平成 27 年 8 月 11 日 (2015. 08. 11)
【米国公開番号】 US2016064901 (A1)
【米国公開日】 平成 28 年 3 月 3 日 (2016. 03. 03)
【優先権情報】 JP2014-165222 (2014. 08. 14) , JP2015-148786 (2015. 07. 28)
【出願人】 国立研究開発法人理化学研究所

(v) 【発明の名称 EN】 Quantum cascade laser element
【米国特許番号】 US10666018 (B2)
【特許登録日】 令和 2 年 5 月 26 日 (2020.05.26)
【米国出願番号】 US201916288707
【米国出願日】 平成 31 年 2 月 29 日 (2019.02.28)
【米国公開番号】 US2019273363 (A1)
【米国公開日】 令和元年 9 月 5 日 (2019.09.05)
【優先権情報】 JP20180037012 (2018.03.01)
【出願人】 国立研究開発法人理化学研究所

(vi) 【発明の名称 EN】 Quantum cascade laser element
【欧州特許番号】 EP3534469 (B1)
【特許登録日】 令和 3 年 6 月 9 日 (2021.06.09)
【欧州出願番号】 EP20190159213
【欧州出願日】 平成 31 年 2 月 25 日 (2019.02.25)
【欧州公開番号】 EP3534469 (A1)
【欧州公開日】 平成 31 年 9 月 4 日 (2019.09.04)
【優先権情報】 2018-37012 (2018.03.01) JP
【出願人】 国立研究開発法人理化学研究所

・ 10 保科

(i) 【発明の名称】 樹脂組成物、並びにそれを用いた成形体及び多層構造体
【出願番号】 特願 2017-169019
【出願日】 平成 29 年 9 月 1 日 (2017.9.1)
【公開番号】 特開 2019-44083
【公開日】 平成 31 年 3 月 22 日 (2019.3.22)
【審査請求日】 令和 2 年 8 月 20 日 (2020.8.20)
【出願人】 「企業」

・ 11 安井

(i) 【発明の名称】 スペクトル分解能とスペクトル確度を向上するフーリエ変換型分光法、分光装置および分光計測プログラム
【国際出願番号】 PCT/JP2013/005031
【出願日】 平成 25 年 8 月 26 日 (2013.8.26)
【特許権者】 国立大学法人大阪大学
【登録番号】 特許第 6032574 号
【登録日】 平成 28 年 11 月 4 日 (2016.11.4)

・ 13 渡邊

(i) 【発明の名称】 光学測定装置、光学測定方法、及び応力検査方法
【出願番号】 特願 2018-537278
【出願日】 平成 29 年 8 月 28 日 (2017.8.28)
【出願人】 学校法人慶應義塾

(ii) 【発明の名称 EN】 OPTICAL MEASUREMENT DEVICE, OPTICAL MEASUREMENT METHOD,

AND STRESS INSPECTION METHOD

【発明の名称 JA】 光学測定装置、光学測定方法、及び応力検査方法
【国際出願番号】 PCT/JP2017/030814
【国際出願日】 平成 29 年 8 月 28 日 (2017. 08. 28)
【国際公開番号】 WO/2018/043438
【国際公開日】 平成 30 年 3 月 8 日 (2018. 03. 08)
【優先権情報】 2016-167370 (2016. 08. 29) JP
【移行に関する情報】 日本 (2019. 02. 26)
【出願人】 学校法人慶應義塾

- (iii) 【発明の名称】 光学測定装置、光学測定方法、及び応力検査方法
【出願番号】 特願 2018-537278
【出願日】 平成 29 年 8 月 28 日 (2017. 8. 28)
【特許権者】 学校法人慶應義塾
【登録番号】 特許第 6843397 号
【登録日】 令和 3 年 2 月 26 日 (2021. 2. 26)
(i) の特許が成立

- (iv) 【発明の名称】 光学測定装置、光学測定方法、及び応力検査方法
【出願番号】 特願 2018-537278
【出願日】 平成 29 年 8 月 28 日 (2017. 8. 28)
【特許権者】 学校法人慶應義塾
【登録番号】 特許第 6843397 号
【登録日】 令和 3 年 2 月 26 日 (2021. 2. 26)

・ 14 河野

- (i) 【発明の名称】 見なし取り下げ →PCT/JP2018/017797
【出願番号】 特願 2017-093445
【出願日】 平成 29 年 5 月 9 日 (2017/05/09)
- (ii) 【発明の名称 EN】 CARBON FILM SUITABLE FOR LIGHT RECEIVING ELEMENTS AND POWER FEED ELEMENTS, WHICH UTILIZE TERAHERTZ WAVES, AND TERAHERTZ WAVE DETECTION DEVICE
【発明の名称 JA】 テラヘルツ波を利用した、受光素子ならびに給電素子に適した炭素膜およびテラヘルツ波検出装置
【国際出願番号】 PCT/JP2018/007347
【国際出願日】 平成 30 年 2 月 27 日 (2018. 02. 27)
【国際公開番号】 WO/2018/159638
【国際公開日】 平成 30 年 7 月 9 日 (2018. 07. 09)
【優先権情報】 2017-036214 (2017. 02. 28) JP
【移行に関する情報】 日本 (2019. 06. 12)
【出願人】 国立大学法人東京工業大学
「企業」
- (iii) 【発明の名称 EN】 CARBON NANOTUBE FILM, TERAHERTZ WAVE DETECTION DEVICE,

AND PN JUNCTION FORMING METHOD FOR CARBON NANOTUBE FILM

【発明の名称 JA】 カーボンナノチューブ膜、テラヘルツ波検出装置およびカーボンナノチューブ膜のPN接合形成方法

【国際出願番号】 PCT/JP2018/017797

【国際出願日】 平成 30 年 5 月 8 日 (2018. 05. 08)

【国際公開番号】 WO/2018/207780

【国際公開日】 平成 30 年 11 月 15 日 (2018. 11. 15)

【優先権情報】 2017-093445 (2017. 05. 09) JP

【移行に関する情報】 日本 (2019. 08. 28)

【出願人】 国立大学法人東京工業大学
「企業」

- (iv) 【発明の名称】 テラヘルツ検出センサ及びテラヘルツ画像測定装置
【出願番号】 特願 2017-556092
【出願日】 平成 28 年 12 月 14 日 (2016. 12. 14)
【特許権者】 国立大学法人東京工業大学
【登録番号】 特許第 6755590 号
【登録日】 令和 2 年 8 月 28 日 (2020. 8. 28)
【優先権主張番号】 特願 2015-244218 (P2015-244218)
【優先日】 平成 27 年 12 月 15 日 (2015. 12. 15)
- (v) 【発明の名称】 テラヘルツ波検出装置およびアレイセンサ
【出願番号】 特願 2018-514736
【出願日】 平成 29 年 4 月 28 日 (2017. 4. 28)
【特許権者】 国立大学法人東京工業大学
【登録番号】 特許第 6758720 号
【登録日】 令和 2 年 9 月 4 日 (2020. 9. 4)
【優先権主張番号】 特願 2016-91298
【優先日】 平成 28 年 4 月 28 日 (2016. 4. 28)
- (vi) 【発明の名称】 プラズモニックアンテナ、プラズモニックアンテナの製造方法
および検出装置
【出願番号】 特願 2016-153599
【出願日】 平成 28 年 8 月 4 日 (2016. 8. 4)
【特許権者】 国立大学法人東京工業大学
【登録番号】 特許第 6807097 号
【登録日】 令和 2 年 12 月 9 日 (2020. 12. 9)
- (vii) 【発明の名称 EN】 TERAHERTZ WAVE DETECTION DEVICE AND ARRAY SENSOR
【米国特許番号】 US10969335 (B2)
【特許登録日】 令和 2 年 4 月 6 日 (2021. 04. 06)
【米国出願番号】 US201716095771
【米国出願日】 平成 29 年 4 月 28 日 (2017. 04. 28)
【米国公開番号】 US2021010932 (A1)
【米国公開日】 令和 2 年 1 月 14 日 (2021. 01. 14)

【優先権情報】 JP20160091298 (2016.04.28) ; W02017JP16947 (2017.04.28)

【出願人】 国立大学法人東京工業大学

PCT 出願, 指定国移行とも JST の海外出願支援制度に採択)

(viii) 【発明の名称 EN】 TERAHERTZ DETECTION SENSOR AND TERAHERTZ IMAGE
MEASUREMENT DEVICE

【米国特許番号】 US10436632 (B2)

【特許登録日】 令和元年 10 月 8 日 (2019.10.08)

【米国出願番号】 US201616062609

【米国出願日】 平成 28 年 12 月 14 日 (2016.12.14)

【米国公開番号】 US2018364094 (A1)

【米国公開日】 平成 30 年 12 月 20 日 (2018.12.20)

【優先権情報】 JP20150244218(2015.12.15);W02016JP87196(2016.12.14)

【出願人】 国立大学法人東京工業大学

(ix) 【発明の名称 EN】 TERAHERTZ WAVE DETECTION DEVICE AND TERAHERTZ WAVE
DETECTION SYSTEM

【米国特許番号】 US11118977 (B2)

【特許登録日】 令和 3 年 9 月 14 日 (2021.09.14)

【米国出願番号】 US201816608684

【米国出願日】 平成 30 年 5 月 9 日 (2018.05.09)

【米国公開番号】 US2020141806 (A1)

【米国公開日】 令和 2 年 5 月 7 日 (2020.05.07)

【優先権情報】 JP20170093256 (2017.05.09) ;W02018JP17921 (2018.05.09)

【出願人】 国立大学法人東京工業大学

・ 17 平川

(i) 【発明の名称】 テラヘルツ波検出装置

【出願番号】 特願 2017-39460

【出願日】 平成 29 年 3 月 2 日 (2017.3.2)

【特許権者】 国立大学法人東京大学

【登録番号】 特許第 6892105 号

【登録日】 令和 3 年 5 月 31 日 (2021.5.31)

③ 受賞

本技術テーマにおける研究開発終了後の受賞歴を表4に示す。

表4 受賞リスト

項番	研究代表者	受賞者	賞の名称（授与機関）	受賞年月
01	浅田雅洋	浅田雅洋	文部科学大臣表彰科学賞（研究部門）	2018. 4. 1
01	浅田雅洋	浅田雅洋	東京都功労者表彰	2020. 10. 1
03	川瀬晃道	村手宏輔	The Best Student Oral Paper Award, (ALPS' 17)	2017. 4. 18-21
03	川瀬晃道	村手宏輔	Outstanding student paper award (IRMMW-THz 2017)	2017. 8. 30
03	川瀬晃道	村手宏輔	育志賞（日本学術振興会）	2018. 3. 6
03	川瀬晃道	村手宏輔,	IEEE Nagoya Section presents Excellent Student Award	2018. 3. 26,
03	川瀬晃道	阪井ひかる	若手優秀講演賞（応用物理学会テラヘルツ電磁波技術研究会）	2018. 11. 8
03	川瀬晃道	嶺颯太	優秀学生発表賞（シンポジウム テラヘルツ科学の最先端 VII）	2020. 11. 20,
03	川瀬晃道	嶺颯太	優秀発表賞（令和2年度レーザー学会中部支部若手研究発表会）	2020. 12. 18
03	川瀬晃道	村手宏輔	優秀論文発表賞（第41回レーザー学会学術講演会）	2021. 5. 31,
03	川瀬晃道	村手宏輔	テラヘルツ研究会賞（優秀発表賞）（電子情報通信学会令和3年度テラヘルツ応用システム研究会）	2021. 8. 5
03	川瀬晃道	嶺颯太	Best Student Presentation Award (IRMMW-THz 2021)	2021
03	川瀬晃道	理研テラヘルツ光源研究チーム	nano tech 大賞 2018「プロジェクト賞」	2018. 2
04	水津光司	高田了一	サマースクール若手優秀講演賞（応用物理学会テラヘルツ帯電磁波技術研究会）	2017. 8
09	廣本宣久	A. Banerjee, H. Satoh, D. Elamaran, N. Hiromoto, H. Inokawa,	"Best Oral Presentation Award" 2nd International Symposium Functional Nanomaterials in Industrial & Clinical Applications, Preston, UK,	2020. 7
09	廣本宣久	猪川洋	高柳記念賞」（公益財団法人 浜松電子工学奨励会）	2019. 12
09	廣本宣久	H. Inokawa, A. Banerjee, D. Elamaran, H. Satoh, N,	Best Paper Award" 16th International Conference on Quality in Research (QiR)	2019. 7

		Hiramoto,		
14	河野行雄	河野行雄	平成 30 年度手島精一記念研究賞	2019
14	河野行雄	鈴木大地	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会・注目講演	2017
14	河野行雄	鈴木大地	第 43 回応用物理学会・講演奨励賞	2018
14	河野行雄	Meiling Sun	Recommended presentation (注目講演) 19th International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-dimensional Materials	2018
14	河野行雄	鈴木大地	平成 30 年度手島精一記念研究賞 (博士論文賞)	2019
14	河野行雄	李恒君	Outstanding Presentation Award (最優秀発表賞) 11th Multidisciplinary International Student Workshop	2019
14	河野行雄	ペンエーク ウォン ケー マナット, 割 澤伸一, 菅谷 俊夫 (D1), 橋本将太 (M1), 河野 行雄, 米谷 玲皇	優秀講演論文賞 (日本機械学会 第 9 回 マイクロ・ナノ工学シンポジウム)	2019
14	河野行雄	李恒君	優秀学生発表賞 (テラヘルツ科学の最先端 VI)	2019
14	河野行雄	李恒君	若手奨励賞 (第 61 回フラレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム)	2021
11	平川一彦	平川一彦	応用物理学会業績賞	2021. 3
18	加藤和利	匂坂知貴	Young Scientist Award (MWP 202)	2020. 11
18	加藤和利	綾野史也	2020 年度 MWP 優秀学生論文賞,	2021. 5
18	加藤和利	要遼平	学生奨励賞 (2021 年電子情報通信学会総合大会 エレクトロニクスソサイエティ)	2021. 9
18	加藤和利	Kazuya Kondo	The MOC Student Award	2021. 10

④ テレビ、新聞報道等

本技術テーマにおける研究開発終了後の取材実績を表5に示す。

表5 取材リスト

項番	研究代表者	取材対応者	内容	公開年月
01	浅田雅洋	瀧田佑馬	日刊工業新聞、「テラヘルツ波 100 倍高感度」	2017. 3. 20
03	川瀬晃道	南出泰亜（理研）	日経新聞電子版「テラヘルツ波 光源小型化に道」	2020. 3. 20
03	川瀬晃道	南出泰亜（理研）	日経新聞電子版「理研、光波長変換による後進テラヘルツ波発振を実現」	2017. 10. 2
08	平山秀樹	平山秀樹	日本経済新聞、「理研、テラヘルツ量子カスケードレーザーの高出力化および高温動作性能の向上に成功」	2019. 2. 15
11	安井武史	安井武史	日経産業新聞、「テラヘルツ波の分光器周波数を素早く計測」	2016. 6. 2
14	河野行雄	河野行雄	産経新聞「中性子線、テラヘルツ波、ドローン 老朽インフラ見抜く科学の目」	2021. 11. 7
14	河野行雄	河野行雄	日経産業新聞「シート状カメラ 電線・配管点検」	2021. 6. 2
14	河野行雄	河野行雄	日刊工業新聞「非破壊検査に活躍するテラヘルツカメラ」	2021. 5. 25
14	河野行雄	河野行雄	科学新聞「ロボットやインフラ設備の即時診断に威力」	2021. 2. 19
14	河野行雄	河野行雄	日経産業新聞「テラヘルツ波対応カメラ 非破壊検査 容易に」	2021. 2. 16
14	河野行雄	河野行雄	日刊工業新聞「非破壊検査 指先に貼るセンサ開発 東工大」	2018. 7. 11
14	河野行雄	河野行雄	化学工業日報「非破壊検査 対象物・場所選ばず 折り曲げ可能、指に装着」	2018. 7. 2
14	河野行雄	河野行雄	日刊工業新聞「非破壊検査 テラヘルツ波を利用」	2018. 3. 16
14	河野行雄	河野行雄	日経産業新聞「テラヘルツ波でがん識別 東工大が応用へ 細胞分析、人体に無害」	2017. 8. 30
14	河野行雄	河野行雄	テレビ東京ワールドビジネスサテライト」のトレンドたまご	2021. 2. 18
14	河野行雄	河野行雄	テレビ東京「News モーニングサテライト」	2021. 2. 18
14	河野行雄	河野行雄	テレビ東京「News モーニングサテライト」	2018. 10. 17
14	河野行雄	河野行雄	TBS テレビ「未来の起源」	2018. 8. 19

18	加藤和利	永妻忠夫 (大阪大)	電波新聞デジタル「ドローン搭載レーダーで煙突内部検査世界初の実験成功 様々な建築物へ応用期待」	2021.06.04
----	------	---------------	--	------------

(5) 研究開発成果に対する制度支援の効果等

今回の追跡調査の回答から、P0、アドバイザー、企業の意見を参考にして研究開発の方向性をその都度確認・修正できる体制であったことは、有益でありその後の企業、研究者との連携にも役にたったと推察される。また、研究者、企業の技術者を含めたコミュニティの形成にも有用であったと推察される。産学共創「テラヘルツ」の各研究課題の終了後の新たな研究プロジェクトの計画、提案や企業と共同研究を進める上でも、研究者にとって有用な経験、知見となり、また実用化を目指す励みにもなったことがわかる。

具体的な回答を以下に列記する。

- ・産学共創プログラムでは、専門や興味が近い多くの関係者との議論ができるどころ、アドバイスや批判を頂けるところがよいと思いました。また、そのような中で、企業の研究者の方々との連携も生まれたので、私にとってはそれが非常に大きかったと思います。
- ・P0 伊藤先生やアドバイザーの方から意見を色々伺えたのはよかったです。特に、企業の研究者の方とつながりを作ることができました。
- ・企業側の意見を参考にして進めることが出来る体制であったことは、研究開発の方向性を都度確認・修正できる環境で貴重であったと思います。

特に、このプログラムの特徴である産学共創の場については、企業の意見を研究に反映しながら進めた経験、産学共創の場で作ることでできた企業や他機関の研究者とのつながりは、課題終了後の共同研究などにも生かされていたと推察される。

- ・企業の意見を研究に反映しながら進められたこと。現在の企業との共同研究に活かされている。
- ・産学共創の場でのつながりから、共同研究に近いつながりが企業と作ることができた。
- ・産学共創の場：企業サイドから有益な情報を得ることでき問題解決につながった。
- ・産学共創の場などでの意見交換。
- ・産学共創の場コミュニティにおける研究ネットワークの形成。
- ・産学共創の場：企業サイドから有益な情報を得ることでき問題解決につながった。
- ・産学共創の場では同業者の視点で様々な意見をいただいた。

本技術テーマで独自に設定した「テラヘルツテクノロジープラットフォーム」(TTP)については、他の研究グループの最先端の成果を利用させてもらうことができ、自身の研究課題の研究開発にも大きく役にたったとの回答があった。また、外部の企業、研究者に貸し出すことにより、多くの研究者に自身の成果を知ってもらうこととともに、開発した技術の長所短所が明らかになり、改良のための技術課題を明確にできたとの回答もあった。課題終了後もテラヘルツテクノロジープラットフォームが、研究開発に有効に機能していたと推察される。また、別途開催した JST 新技術説明会「テラヘルツ」についても企業に研究開発した技術を知っていただくよい機会となったとのコメントがあった。

- ・テラヘルツテクノロジープラットフォームの設立により、研究成果である小型テラヘルツ光源をいろいろな研究機関に貸し出すことができ、多くの研究者に知ってもらえたことと、これによって、長所短所が明らかになり研究課題を明確にできた。
- ・テラヘルツテクノロジープラットフォームは、最先端の成果を利用できて、大変有意義でした。
- ・テラヘルツテクノロジープラットフォームによる最新・最先端のデバイス・装置等の外部利用が役に立った。
- ・テラヘルツテクノロジープラットフォームによりユーザーとの接点が広がった。
- ・テラヘルツテクノロジープラットフォーム：高感度テラヘルツ検出器を利用することができ、大幅な高感度化が実現した。
- ・JST 主催の新技术説明会は、企業からの反響を頂けるよい機会になりました。

プログラム全体については、基礎と応用の間にある研究もカバーしており大変ありがたかった、そこで得た知見は、製品開発に役立ったとの回答があった。また、産業化を目指しているが、科学技術にフォーカスをしたプログラムでもあり、可能性を発掘するプログラムであったため、従来の延長線上とは異なる新しい技術を開拓することができたとの回答もあった。産業への応用を前提としつつも、基盤研究の位置づけであるこのプログラムの立位置の重要性がうかがわれる。また、開発した技術の産業界への展開にあたり市場調査やコンサルタントなどの支援の仕組みを期待するとのコメントをいただいた。

- ・このプログラムのように、基礎と応用の間の研究もカバーしていただけるプログラムは、大変有難かったです。そこで得た知見は、製品開発に役立てられています。
- ・JST でも採択までに市場規模や事業性などを求めるものがある中で、科学技術にフォーカスをし、可能性を発掘するプログラムであった。
- ・共同研究者である他大学との研究連携が強化され、課題終了後に研究継続、研究資金獲得を協力して行うことができた。
- ・市場調査やコンサルタントなど、(研究開発メインではない) 市場展開を図るうえで不可欠な要素について調査・支援してくださる仕組みがあるとよい。

4. 総合所見

本技術テーマは、テラヘルツ波技術を産業応用に繋げるため、革新的な基盤技術により要素技術を創出することを目指す研究開発であった。技術テーマ終了後2年を経過した現時点では、本技術テーマで研究開発されたテラヘルツ波技術の要素技術である光源、検出器デバイス、応用計測システムは、製品の量産化段階、技術の社会実装までには至っていないが、個別の要素技術は、直実に実用化に向け進歩している。

半導体素子については RTD の高出力化、発振周波数の向上、RTD や FMB ダイオードのアレイ化につながる技術開発など着実に進歩している。また、検出についても FMB ダイオードを用いたヘテロダイン検波及び分数周波検波による高感度、低ノイズ検出が実証され、セキュリティ、イメージング、通信など様々な応用が検討されつつある。

非線形テラヘルツ波デバイスでは、コンパクトサイズで光学波長変換による高効率・高出力テラヘルツ波発生を実現、テラヘルツ波検出に光波への波長逆変換を利用した高感度検出技術高感度検出技術を開発し、高感度のガス検出などを実証している。

応用・計測システムについては、テラヘルツ近接センサーを利用した細菌の薬剤感受性検査装置等への応用が始まりつつある。またテラヘルツ波ケミカル顕微鏡によるアプタマーで標識化したガンがん細胞の検出が実証されており、医薬、バイオ分野への応用が期待されている。

化学分野への応用では、生分解ポリマー、汎用樹脂などを網羅したテラヘルツ分光のデータが蓄積されつつあり、ポリマー構造の解明、物性改良、劣化現象の解明に、テラヘルツ分光が有力な分析手段の一つになりつつある。また、周波数を広い範囲で可変できるフォトミキシング光源を用いたテラヘルツ領域の新しい電子スピン共鳴 (ESR) 分光法が開発されており、有機ラジカルや遷移金属酸化物イオンなどの有力な解析ツールとなることが期待できる。

各研究課題の現在の研究体制については全研究課題 24 課題の内、16 課題 (67%) が当該研究課題の研究を継続しており、4 課題 (17%) が派生的な研究開発を継続している。現時点で継続中の企業との共同研究は 9 件 (注、課題数ではない) である。自機関 (及び他大学との共同研究) で研究を継続は 15 件であり、さらなる企業との共同研究の推進が望まれる。

産業界、企業が製品開発、機器導入に踏み込むには、技術を製品化前提でよりブラッシュアップすること、事業性、市場性を検証する取り組みが必要である。今回の調査の回答から、本技術テーマ独自の取り組みとして設定したテラヘルツテクノロジープラットフォームが課題終了後もこの点で有効に機能していたことが明らかになった。試作デバイス、装置の貸し出しは、他の研究グループの最先端の成果を利用することができ、自身の研究開発にも大きく役立つとともに、外部の企業、研究者に貸し出すことにより、多くの企業や他分野の研究者に自身の成果を知ってもらうことにも貢献した。また開発した技術の長所短所、産業界のニーズも明らかになり、改良のための研究課題を明確することにも役にたった。

一方で、課題終了後に開発した技術の産業界への展開にあたり市場調査やコンサルタントなどの支援の仕組みを期待するとのコメントもいただいている。この点については、海外の研究動向調査レポートを研究者への提供し、課題終了後に JST の社会還元加速プログラム (SCORE) で事業化の検討を支援した課題もあるが、市場ニーズの調査として、展開可能性のある産業分野について競合技術を含めた比較検討、技術動向ロードマップの作成、企業動向の把握などの総合的な取り組みと支援が期待されている。

COVID-19 感染拡大による影響については、自機関の研究、企業との共同研究、公的競争資金への応募などが計画通りに進められないことがあったとの回答が複数あった。また企業との面談の機会が減少し、情報収集や応用開拓のペースが下がった、企業がコロナ対応の技術開発に注力したため共同研究がストップしたとの回答もあった。遠隔会議の普及により、共同研究に関する議論はむしろ活発になったが、同業者や分野外の方との議論の場が極端に減ったことで、学術情報の流通に差し障りが出たとの回答もあった。企業との共同開発には、実際に試作品や装置を見ながらの議論も必要であり、また企業との共同開発、技術移転の調整には、交渉も伴うため、遠隔会議では難しさを感じるかもしれないが、状況に応じて積極的に活用していくことが、with コロナの時代には必要となる。また、今後もしばらくは物品調達や企業での試作スケジュールなどに障害を生じることが危惧される現状では、リスク管理の視点で緻密、かつ柔軟な研究計画のもとで研究開発を進めていくことが望まれる。

最後に、追跡調査にご協力を頂いた研究代表者、共同研究グループの先生方へ感謝を申し上げます。研究者の先生方のご研究が益々発展されますことを祈念いたします。

以上