

機関番号：14401  
研究種目：基盤研究(A)  
研究期間：2008～2010  
課題番号：20246062  
研究課題名(和文) 300GHz帯を利用した20Gbit/s級高速無線技術に関する研究  
研究課題名(英文) 20-Gbit/s wireless communications using 300-GHz bands  
研究代表者  
永妻 忠夫 (NAGATSUMA TADAO)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授  
研究者番号：00452417

研究成果の概要(和文)：有線(光ファイバ)通信と無線通信の伝送速度のギャップを解消することを目的のひとつとして、現在未利用の周波数帯である300GHz帯の電波を用いた無線通信技術の開発に世界に先駆けて挑戦した。所期の目標どおり、20Gbit/sを超える無線伝送に成功した。決め手となった独自技術は、光技術を用いた300GHz帯電波の発生ならびに変調技術である。本研究がトリガーとなり、海外においても300GHz帯無線の研究開発が活発になる中、常にこの分野を牽引した。

研究成果の概要(英文)：In order to decrease a significant gap in the speed between wired (fiber-optic) and wireless communications, we have made a challenge to realize ultra-high speed wireless links using 300-GHz bands, which have remained undeveloped. We have succeeded in the experimental demonstration at a bit rate of over 20 Gbit/s. One of the original enabling technologies is photonic generation and modulation of 300-GHz band signals. This research is positioned as a trigger to explore 300-GHz bands wireless technologies in the world.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	16,700,000	5,010,000	21,710,000
2009年度	12,300,000	3,690,000	15,990,000
2010年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
年度			
年度			
総計	36,100,000	10,830,000	46,930,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：先端的通信、電子デバイス・機器、無線通信、ミリ波、テラヘルツ波

## 1. 研究開始当初の背景

当時、無線通信における最高の伝送速度は10Gbit/sであり、それは120GHz帯の電波を利用したものであった。光ファイバ通信の速度が、10Gbit/s、40Gbit/s、100Gbit/sと増加する中で、無線の更なる高速化に対するニーズが高まっていた。

## 2. 研究の目的

本研究は、これまでの伝送速度を大幅に上回る、20Gbit/sの超高速無線通信の実現に向け、キャリア周波数として300GHzという未踏の電波領域を利用することに挑戦し、単に世界最高の通信速度を達成するという目的だけではなく、実際の伝送実験を通して、こ

のような新しい電波の伝搬特性や取り扱いの容易性を含め、利用上の特徴や課題を世界に先駆けて明らかにすることを目的としている。

### 3. 研究の方法

300GHz 帯の電波を利用した無線通信の実現において、高速化の最大のボトルネックは、300GHz 帯の電波の発生と広帯域変調を行う送信技術である。現時点では、電子デバイス技術のみで高出力でかつ広帯域変調が可能な送信器を実現することが困難であるため、図1に示すように光技術を導入した。すなわち、光の領域で 300GHz の信号（周波数 300GHz で強度変調された光信号）の発生と変調を行い、最後にフォトダイオードで光電変換して電気信号（電波）として空間に放射するというコンセプトである。

受信は、ショットキーバリアダイオードを用いた直接（包絡線）検波器で行い、検出されたベースバンド信号を復調信号として取り出す。

本研究では、送信器の性能を最終的に決めるフォトダイオードの広帯域・高出力化、ならびに受信器におけるベースバンド帯域の広帯域化に注力した。

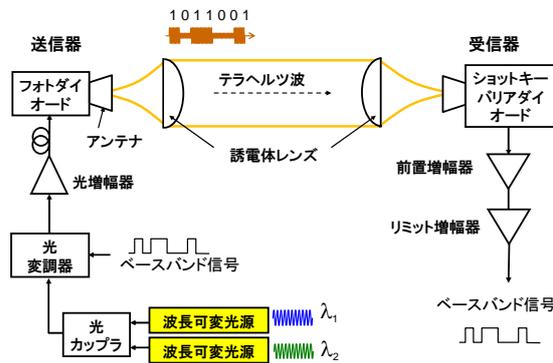


図1 フォトニクス技術を利用した 300GHz 帯無線リンクのコンセプト。

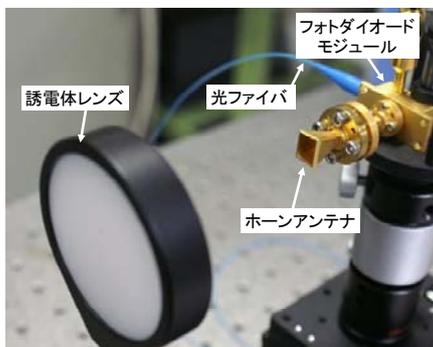


図2 送信器フロントエンドの外観。

### 4. 研究成果

#### (1) フォトダイオードの広帯域化・高出力化

図3は、フォトダイオードの出力の周波数依存性である。3dB 帯域（出力が半分となる帯域幅）は 140GHz である。この帯域幅は、デジタル振幅変調(ASK)の場合、90Gbit/s の伝送速度に対応するものである。

単体のフォトダイオードでの出力上限は、500-600 $\mu$ W 程度であるため、通信距離の長尺化にはさらなる高出力が不可欠である。本研究では、複数のフォトダイオードの出力を電力合成する手法を採用し、その開発に取り組んだ。2 個のフォトダイオードの電力合成でも、1mW の出力が得られることが実験的に確認された。

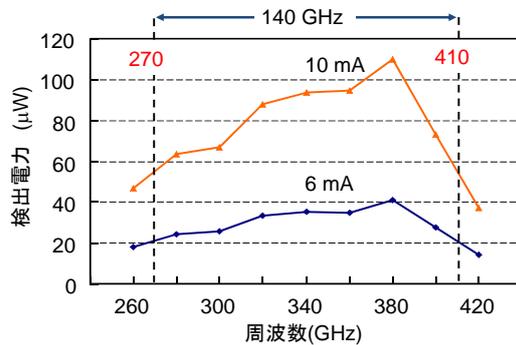


図3 単体のフォトダイオードの出力特性（光電流が 6mA、10mA の場合を示す）。

#### (2) 受信器の広帯域化

受信器に用いるショットキーバリアダイオード自身の動作周波数は数 100GHz のオーダーであり、通信応用においては、復調後のベースバンド信号の帯域を拡大することが重要である。20Gbit/s を実現するには、15GHz 以上の帯域を要求され、実装を含めて、その広帯域化を図った。

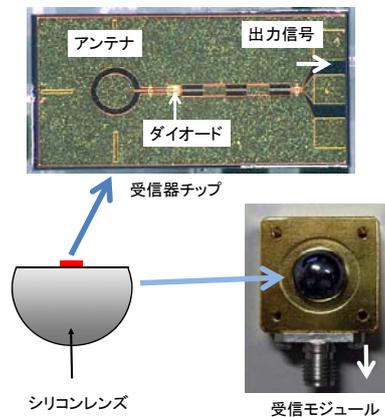


図4 受信回路および実装モジュール。

図4に、アンテナを集積した受信回路チップとその実装モジュールを示す。チップにはシリコンレンズを固定し、電波を効率的にアンテナに導入できるように設計した。

### (3) >10Gbit/s 伝送実験

図5は、伝送速度 12.5Gbit/s で無線伝送実験（通信距離は約 1m）を行い、ビット誤り率（エラー）率を送信器のフォトダイオード電流（送信電力の 1/2 乗に比例）を変えて測定したものである。フォトダイオード電流が約 4mA でエラーフリーとなり、この時の送信電力は図3より約 10 $\mu$ W となる。このように、近接無線であれば、マイクロワットの電力レベルで 10Gbit/s を超える無線伝送ができるという興味深い結果が得られた。

図6は、20Gbit/s における受信後のアイパターンである。所有する計測装置の限界で、図5のようなビット誤り率を測定できなかったが、十分はアイ開口が得られていることから、エラーフリー伝送が達成できていると結論できる。

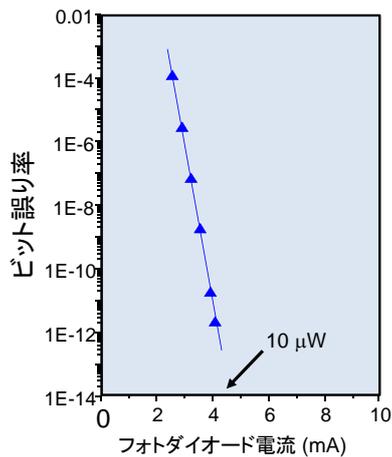


図5 ビットエラー率の送信器フォトダイオード電流依存性.

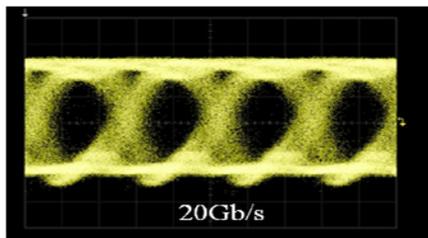


図6 伝送速度 20Gbit/s でのアイパターン.

以上、3年間の研究を通して、所期の目標どおり、300GHz帯無線で 20Gbit/s の伝送速度を達成した。また、更なる伝送速度の向上、

伝送距離の長尺化に不可欠な送信器の高出力化の一手法として、フォトダイオードの出力合成が有効であることを実証した。

275GHz を超える周波数領域は国際的にも利用割当てがなされていないことから、本研究の立ち上げとほぼ同時期に、300GHz帯無線に対する関心が世界的に高まった。タイムリーにも本研究によって、常にこの分野で我が国としてリーダーシップを発揮することができた。

本研究開発に並行して、テラヘルツ無線技術に関するスタディグループ（報告者が座長を務める）を近畿総合通信局に設置し、産官学のメンバーでテラヘルツ無線の今後の研究戦略や標準化に向けた議論を足掛け2年にわたり重ねた。詳しい報告書は、

<http://www.soumu.go.jp/soutsu/kinki/studygroup/2010/THz/index.html>

を参照されたい。

### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 11 件）

- ① T. Kleine-Ostmann and T. Nagatsuma, *A Review on Terahertz Communications Research*, J. Infrared Millimeter & Terahertz Waves. 32 (2011) 141-171 査読有
- ② T. Nagatsuma, *Challenges for Ultrahigh Speed Wireless Communications Using Terahertz Waves*, J. Terahertz Science and Technology. 3 (2010) 55-65 査読有
- ③ H.-J. Song, N. Shimizu, Y. Kado and T. Nagatsuma, *Photonic Generation of Continuous Terahertz Waves and its Application to Communications and Sensing*, Proc. SPIE. 7763(2010) 776307-776307-10 査読無
- ④ H.-J. Song, and T. Nagatsuma, *Terahertz waves are coming to the real world*, SPIE Newsroom (7 October 2010) 10. 1117/2 (2010) 003117 査読無
- ⑤ H.-J. Song, K. Ajito, A. Hirata, A. Wakatsuki, Y. Muramoto, N. Kukutsu, T. Nagatsuma, Y. Kado, *8Gbps Wireless Data Transmission at 250 GHz*, Electron. Lett, 45 (2009) 1121-1122 査読有
- ⑥ 永妻忠夫, テラヘルツ技術の最新動向と今後の展望, オプトニュース, 3 (2009) 8-15 査読有

- ⑦ T. Nagatsuma, *Generating Millimeter and Terahertz Waves*, IEEE Microwave Magazine. 10 (2009) 64-74 査読有
- ⑧ T. Kosugi; A. Hirata; T. Nagatsuma, Y. Kado, *MM-wave Long-range Wireless Systems*, IEEE Microwave Magazine, 10 (2009) 68-76, 査読有
- ⑨ T. Nagatsuma, Hiroshi Ito, Tadao Ishibashi, *High-power RF Photodiodes and Their Applications*, Laser and Photonics Review. 3 (2009) 123-137 査読有
- ⑩ 永妻忠夫, テラヘルツ波の新産業展開, 生産と技術. 61 (2009) 3-7 査読無
- ⑪ 永妻忠夫, 高出力RFフォトダイオードとその応用, オプトロニクス. 27 (2008) 122-128 査読無

[学会発表] (計 46 件)

- ① 荒川和輝, 高田卓馬, ソンホジン, 味戸克裕, 若月温, 村本好史, 久々津直哉, 永妻忠夫, 光技術を用いたテラヘルツ無線における光源の検討(2) キャリア・ノイズ比が及ぼす影響, 電子情報通信学会総合大会, 2011年3月17日, 東京都市大学
- ② 高田卓馬, 荒川和輝, ソンホジン, 味戸克裕, 若月温, 村本好史, 久々津直哉, 永妻忠夫, 光技術を用いたテラヘルツ無線における光源の検討(1)変調度が及ぼす影響, 電子情報通信学会総合大会, 2011年3月17日, 東京都市大学
- ③ 永妻忠夫, テラヘルツ無線通信の現状と将来展望, 電子情報通信学会・電子デバイス研究会, 2010年12月19日, 東北大学
- ④ T. Nagatsuma, T. Takada, H.-J. Song, K. Ajito, N. Kukutsu, and Y. Kado, *Millimeter- and THz-wave Photonics Towards 100Gbit/s Wireless Transmission*, The 23rd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society, 2010年11月10日, デンバー、米国
- ⑤ T. Nagatsuma, H.-J. Song, Y. Fujimoto, T. Takada, M. Kawamura, K. Ajito, N. Kukutsu, Y. Kado, A. Wakatsuki, and Y. Muramoto, *300-GHz-Band Wireless Link Based on Photonic Signal Generation*, EOS Annual Meeting 2010, 2010年10月26日, フランス、パリ
- ⑥ T. Nagatsuma, T. Kumashiro, K. Takada, M. Kawamura, H.-J. Song, K. Ajito, and N. Kukutsu, *Photonic Generation of THz Waves and Their Applications to Sensing and Communications*, International Symposium on Frontier of Terahertz Spectroscopy IV, 2010年10月20日, 信州大学
- ⑦ T. Nagatsuma, *Recent Developments and Future Challenges in THz Communications*, GDR-I Meeting, Joint GDR-I and JST-ANR session, 2010年9月28日, フランス、パリ
- ⑧ T. Nagatsuma, *100-400 GHz Band Wireless Communications Technology Based on Photonic Signal Generation*, Asia-Pacific Radio Science Conference 2010, 2010年9月26日, 富山国際会議場
- ⑨ T. Nagatsuma, *Extreme Bandwidth Wireless Communications Using Terahertz Waves*, 20th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECom 2010), 2010年9月23日, ドブロブニク、クロアチア
- ⑩ 高田卓馬, ソンホジン, 味戸克裕, 枚田明彦, 若月温, 村本好史, 久々津直哉, 門勇一, 永妻忠夫, 300GHz帯無線システムを用いた14Gbps伝送実験, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2010年9月14日, 大阪府立大学
- ⑪ 川村昌史, ソンホジン, 高田卓馬, 三宅一正, 味戸克裕, 久々津直哉, 若月温, 村本好史, 門勇一, 永妻忠夫, 300GHz帯無線リンクにおけるダイオード検波の感度特性, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2010年9月14日, 大阪府立大学
- ⑫ 永妻忠夫, 300GHz帯を利用したギガビット無線リンク, 電気学会電子・情報・システム部門大会, 2010年9月2日, 熊本大学
- ⑬ H.-J. Song and T. Nagatsuma, *Photonic Generation of Continuous Terahertz Waves and its Application to Communications and Sensing*, SPIE Optics+Photonics Meeting, 2010年8月1日, サンディエゴ、米国
- ⑭ T. Nagatsuma, *Technology Trend of Telecommunications above 120 GHz*, Asia Pacific Telecommunity, 17th APT Standardization Program Forum, 2010年7月5日, パタヤ、タイ
- ⑮ 永妻忠夫, テラヘルツ波無線の現状と今後の展望, 応用物理学会 超伝導分科会第41回研究会, 2010年6月24日, 大阪大学・中之島センター
- ⑯ N. Kukutsu, A. Hirata, M. Yaita K. Ajito, H. Takahashi, T. Kosugi, H. Song, A. Wakatsuki, Y. Muramoto, T. Nagatsuma, Y. Kado, *Toward Practical*

- Applications over 100 GHz*, IEEE MTT-S Intern. Microwave Symposium, THIA-5, 2010年5月27日, アナハイム、米国
- ⑰ 永妻忠夫, 未開の電波～テラヘルツ波～の通信応用を考える, 情報通信学会 関西支部 平成22年度 第1回研究会【マルチメディア研究会】, 2010年5月20日, 関西学院大学 大阪梅田キャンパス
- ⑱ T. Nagatsuma, *Applications of Terahertz Photodiodes to Communications and Sensing*, 7th Asia-Pacific Laser Symposium, 2010年5月13日, 韓国、済州島
- ⑲ T. Nagatsuma, *Challenges for Ultrahigh-speed Wireless Communications Using Terahertz Waves*, China-Japan Information and Communications Technology Forum 2010, 2010年4月23日, 東京
- ⑳ Y. Kado, M. Shinagawa, H.-J. Song, T. Nagatsuma, *Close Proximity Wireless Communication Technologies Using Shortwaves, Microwave, and Sub-Terahertz Waves*, Progress in Electromagnetics Research, 2010年3月24日, Xi'an, China
- ㉑ 熊城拓人, 味戸克裕, 久々津直哉, 若月温, 村本好史, 門勇一, 永妻忠夫, SLD光源を用いた高画質ミリ波イメージング, 電子情報通信学会総合大会, 2010年3月16日, 東北大学
- ㉒ 藤本吉秀, 高田卓馬, ソンホジン, 味戸克裕, 枚田明彦, 若月温, 村本好史, 久々津直哉, 門勇一, 永妻忠夫, ゼロバイアス送受信器による300GHz帯ギガビット無線システム, 電子情報通信学会総合大会, 2010年3月16日, 東北大学
- ㉓ T. Nagatsuma, Y. Kado, *Towards 100-Gbit/s Wireless Communications Using Terahertz Waves*, 65th IEEE 802.15 WPAN MEETING, 2010年3月15日, Orland, USA
- ㉔ 永妻忠夫, 岩月勝美, マイクロ波フォトニクス技術の動向と今後の展開-光ファイバー無線技術を中心として-, フォトニックネットワーク新時代における産業・技術懇談会, 第5回公開討論会, 2010年3月3日, 情報通信研究機構小金井
- ㉕ 永妻忠夫, テラヘルツ波の無線通信応用に向けて, 第7回産学官連携セミナー (近畿総合通信局), 2010年1月29日, 大阪大学中之島センター
- ㉖ 藤本吉秀, ソンホジン, 高田卓馬, 三宅一正, 味戸克裕, 枚田明彦, 若月温, 村本好文, 久々津直哉, 門勇一, 永妻忠夫, フォトニクス技術を用いた300GHz帯無線システム, 電子情報通信学会マイクロ波・ミリ波フォトニクス(MWP)研究会, 2010年1月27日, 産業技術総合研究所 (大阪)
- ㉗ T. Nagatsuma, Y. Kado, *Towards 100-Gbit/s Wireless Using Terahertz Waves*, International Workshop on Terahertz Technology (TeraTech 2009) 2009年12月2日, Osaka, Japan
- ㉘ T. Nagatsuma, *Challenges for Ultrahigh-speed Wireless Communications Using Terahertz Waves*, Shenzhen International Conference on Advanced Science and Technology (SICAST 2009), 2009年11月16日, Shenzhen, China
- ㉙ 三宅一正, 藤本吉秀, ソンホジン, 味戸克裕, 久々津直哉, 門勇一, 永妻忠夫, ミリ波帯における電力合成手法の検討, 2009年度電気関係学会関西支部連合大会, 2009年11月8日, 京都工繊大学
- ㉚ T. Nagatsuma, H.-J. Song, Y. Fujimoto, A. Hirata, K. Miake, K. Ajito, A. Wakatuski, T. Furuta, N. Kukutsu, *Giga-bit Wireless link Using 300-400 GHz Bands*, IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2009), 2009年10月15日, Valencia, Spain
- ㉛ H.-J. Song, K. Ajito, A. Hirata, A. Wakatsuki, T. Furuta, N. Kukutsu, T. Nagatsuma, *Multi-Gigabit Wireless Data Transmission at over 200-GHz Band*, IRMMW-THz2009, 2009年9月24日, Busan, Korea
- ㉜ 熊城拓人, 藤本吉秀, 谷口浩二, 味戸克裕, 久々津直哉, 古田知史, 門勇一, 永妻忠夫, インコヒーレントノイズ源を用いたミリ波イメージングシステム, 電子情報通信学会2009年ソサイエティ大会, 2009年9月16日, 新潟大学
- ㉝ 貝野彰, 久武信太郎, 味戸克裕, ソンホジン, 若月温, 古田知史, 久々津直哉, 門勇一, 永妻忠夫, フォトダイオードをダウンコンバータに利用した300GHz帯ホモダイン検波システム, 電子情報通信学会2009年ソサイエティ大会, 2009年9月16日, 新潟大学
- ㉞ 藤本吉秀, ソンホジン, 三宅一正, 味戸克裕, 枚田明彦, 若月温, 古田知史, 久々津直哉, 門勇一, 永妻忠夫, フォトニクス技術を用いた300GHz帯ギガビット無線システム, 電子情報通信学会2009年ソサイエティ大会, 2009年9月16日, 新潟大学
- ㉟ 永妻忠夫, テラヘルツ技術の産業化に向けたロードマップ, 第78回テレコム技術情

報セミナー, 2009年6月26日, コクヨホール

- ㉞ 永妻忠夫, テラヘルツテクノロジー産業化のためのロードマップ, テラヘルツテクノロジーフォーラム第7回総会・講演会, 2009年5月22日, 東京大学駒場キャンパス
- ㉟ 永妻忠夫, 高速無線通信技術の最近の動向と今後の課題, 第6回マイクロ波・ミリ波フォトニクス (MWP) ワークショップ, 2009年4月17日, 虎ノ門パストラル
- ㊱ 永妻忠夫, テラヘルツ波の通信応用に向けた展望と課題, 第3回テラヘルツ電磁波産業利用研究会, 2009年1月15日, 大阪府商工会館
- ㊲ 永妻忠夫, テラヘルツ波を利用した無線技術の現状と課題, レーザー学会学術講演会第29回年次大会, 2009年1月12日, 徳島大学
- ㊳ T. Nagatsuma, *High-Power RF Photodiodes and Their Applications*, International Conference on Laser Applications in Life Sciences (LALS2008), 2008年12月6日, Taipei, Taiwan
- ㊴ 永妻忠夫, テラヘルツ波の通信応用, 電気四学会 関西支部 専門講習会, 2008年10月8日, 中央電気倶楽部 (大阪)
- ㊵ T. Nagatsuma, *Radio Spectral Evolution with Photonics*, IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2008), 2008年10月1日, Gold Coast, Australia
- ㊶ 永妻忠夫, テラヘルツ技術の現状と今後の応用展開, 第13回EMC関西 2008, 2008年9月25日, 兵庫県中央労働センター (神戸)
- ㊷ 谷口浩二, 藤本吉秀, 都甲浩芳, 味戸克裕, 久々津直哉, 永妻忠夫, バイアス変調法による高速フォトダイオードの評価, 2008電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2008年9月17日, 明治大学生田キャンパス
- ㊸ 藤本吉秀, 谷口浩二, 味戸克裕, 都甲浩芳, 久々津直哉, 永妻忠夫, フォトミキシングによるホモダイン検波の安定性の評価, 2008電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2008年9月17日, 明治大学生田キャンパス
- ㊹ T. Nagatsuma, *Photonic Devices for Optical and Wireless Access Integrated Systems*, Nano-Optoelectronics Workshop, i-NOW 2008, 2008年8月12日, Shonan Village, Japan

[図書] (計2件)

- ① T. Nagatsuma and H. Ito, InTech - Open Access Publisher, *Advances in Photodiodes: High-Power RF Uni-Travelling-Carrier Photodiodes*

(UTC-PDs) and Their Applications (分担), ISBN 978-953-307-163-3, 2011

- ② 永妻忠夫, シーエムシー出版, テラヘルツ波新産業: 第11章 テラヘルツ波の情報通信利用, 第13章 300GHz超の無線技術と課題, 2010, 238-247, 269-273

[その他]

- ①産学官連携による調査検討会と公開実験: 総務省近畿総合通信局における「テラヘルツ波の情報通信利用に関する調査検討会」に研究代表は座長として参画し、研究開発の意義やロードマップを提唱するとともに、公開実験を通して重要性をアピール(2009年~2011年)
- ②海外における無線通信に関する標準化会議 (IEEE802.15THzIG および ASTAP) に出席し、将来の周波数獲得に向けたコンセンサスを得るとともに、我が国の先導性をアピール(2010年)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

永妻 忠夫 (NAGATSUMA TADAO)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授  
研究者番号: 00452417

### (2) 研究分担者

高原 淳一 (TAKAHARA JUNICHI)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 90273606

久武 信太郎 (HISATAKE SHINTARO)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教  
研究者番号: 20362642

### (3) 研究協力者

N T T (ソン・ホジン, 味戸克裕, 枚田明彦, 都甲浩芳, 久々津直哉, 門勇一, 若月温, 村本好文)