

# 欧州におけるテラヘルツ技術の研究開発の動向調査

報告書

情報通信研究機構 欧州連携センター

平成 25 年 11 月 29 日

# 目次

はじめに.....	1
報告書の要約.....	1
第一章 欧州連合の第七次枠組計画におけるテラヘルツ技術の研究開発助成及び研究開発活動動向 .....	8
第一節 FP7 ICT 作業プログラムにおけるテラヘルツ技術の支援動向.....	8
第二節 FP7 ICT 部門のテラヘルツ技術の研究プロジェクト事例.....	9
「TERACOMB」プロジェクト（量子カスケードレーザ） .....	10
「ULTRAPHASE」プロジェクト（超高速量子物理学） .....	11
「LIGHTER」プロジェクト（テラヘルツ分光法） .....	12
「THzPowerElectronics」プロジェクト（半導体トランジスタ） .....	13
「GRADE」プロジェクト（電子デバイス） .....	15
「iPHOS」プロジェクト（受信器と超高速通信システム） .....	16
「DOTFIVE」プロジェクト及び「DOTSEVEN」プロジェクト（回路） .....	18
「INSIDDE」プロジェクト（芸術作品向けテラヘルツカメラ） .....	21
「ULTRA」プロジェクト（医療・生物・化学分析向けテラヘルツアプリケーション） .....	22
第三節 FP7 セキュリティ部門のテラヘルツ技術の研究開発動向.....	23
第二章 欧州主要国における公的研究助成機関のテラヘルツ技術への支援動向.....	25
第一節 英国 .....	25
工学・物理科学研究評議会（EPSRC） .....	25

第二節 ドイツ.....	29
ドイツ連邦教育研究省（BMBF）とドイツ研究基金（DFG） .....	29
第三節 フランス.....	33
国立研究機構（ANR） .....	33
第三章 欧州諸国の公的研究機関におけるテラヘルツ技術の研究開発体制及び研究 活動動向.....	35
第一節 英国 .....	35
国立物理研究所（NPL） .....	36
英国の大学機関：インペリアル・カレッジロンドン大学：テラヘルツ科学・工学 .....	37
センター .....	37
第二節 ドイツ.....	38
物理工学研究所（PTB） .....	38
ヒアリング議事録 / ドイツ物理工学研究所（PTB）ベルリン.....	41
ヒアリング議事録 / ドイツ物理工学研究所（PTB）ブラウンシュバイク .....	52
フェルディナンド・ブラウン高周波研究所（FBH） .....	62
ヒアリング議事録 / フェルディナンド・ブラウン高周波研究所（FBH） .....	63
マックスプランク・ポリマーリサーチ研究所.....	71
ヒアリング議事録 / マックスプランク・ポリマーリサーチ研究所.....	72
フラウンホーファー協会・応用固体物理研究所とハインリッヒ・ヘルツ研究院 .....	82
その他（大学機関等） .....	83

第三節 フランス.....	83
ポリテクニク工科大学.....	84
フランスの大学機関：パリ第七大学ディドロ、モンペリエ第二大学、ボルドー第一大学.....	84
電子情報技術研究所（LETI）.....	85
第四節 ベルギー.....	85
IMEC.....	86
ETRO：ブリュッセル自由大学の電子工学・情報学科.....	86
ヒアリング議事録 / ETRO.....	87
第四章 ICT イベント視察レポート：欧州マイクロ波週間（EuMW）におけるテラヘルツ技術のワークショップ.....	93
第五章 欧州におけるテラヘルツ帯の利用割当及びテラヘルツ技術の標準化動向	117
第一節 欧州における電波の定義とテラヘルツ帯の利用割当の現状.....	117
第二節 欧州におけるテラヘルツ帯の利用割当と標準化活動の動向.....	117
欧州郵便・電気通信主管庁会議（CEPT）・欧州通信庁（ECO）への調査.....	118
第三節 欧州におけるテラヘルツ波の生体への影響に対する法的規制と研究....	120
まとめ.....	121

## はじめに

### 調査理由

電波と光波の境界に位置し、100GHz～10THz の周波数である「テラヘルツ帯」の電磁波領域は、その発生や検出などについて技術的に取扱いが難しいことから、未開拓のまま残されてきた。しかし、近年の研究開発の進展により、テラヘルツ帯の電磁波を新たなイメージングや計測、大容量通信等に利用する可能性が注目されている。また、最近では、トンネルや橋梁などのインフラのメンテナンスのような社会的課題に対応するためにテラヘルツ波によって測定するという実用化も課題となっている。

情報通信研究機構（以下、当機構とする）では、従来から「未来ICT研究所超高周波ICT研究開発室」<sup>1</sup>で研究開発を実施するとともに、2012年6月に「テラヘルツ研究センター」<sup>2</sup>を設置し、研究所の枠に捉われない枠組みでテラヘルツ技術の研究開発を進めているところである。これは、NICTの持つ材料からシステム化までの様々な研究開発力を結集し、また国内外の研究機関との連携を図ることで、テラヘルツ帯の電磁波に関する研究開発の推進と、産業界や学界など幅広い利用推進に貢献しようとするものである。

テラヘルツ技術の研究開発は、世界各国、とりわけ欧州でもこれまで以上に加速しつつあり、欧州における研究開発の現状を的確に捉え、当機構の研究開発にフィードバックすることが、今後の標準化等を見据えた場合に重要となっている。

このため、本調査では、欧州におけるテラヘルツ技術の研究開発の動向として、テラ

---

<sup>1</sup> [http://www.nict.go.jp/advanced\\_ict/terahz/index.html](http://www.nict.go.jp/advanced_ict/terahz/index.html)

<sup>2</sup> <http://www2.nict.go.jp/ttrc/>

ヘルツ技術関連のファンド、大型プロジェクト等に関する予算、期間、目標、研究開発内容等を調査した。第一章では、欧州連合（EU）の「第七次枠組計画（FP7）」におけるテラヘルツ技術研究開発支援動向及び研究プロジェクト事例、第二章では、欧州主要国（英・独・仏）のファンディングエージェンシー（研究助成機関）の動向と研究プロジェクト事例、第三章では欧州主要国（英・独・仏・ベルギー）の国立若しくは公的研究機関、大学における研究開発機関の研究開発体制と活動動向、第四章では、欧州におけるテラヘルツの利用割当と標準化動向について記す。研究プロジェクト事例に関しては、275GHz～1THzの周波数範囲における無線通信技術、レーダ技術、電子デバイス・回路・アンテナ技術、テラヘルツ帯におけるいわゆる THz-TDS（Terahertz Time Domain Spectroscopy）技術、その基盤となる技術及び応用開発、テラヘルツカメラに関する研究開発状況、テラヘルツ波を用いたセンサー関連応用技術（非破壊検査等）に着目した。また、トンネルや橋梁などのインフラのメンテナンスのような社会的課題に対応するためのテラヘルツ波による測定の実用化に向けた動きと、その際のミリ波や赤外線等と比較したメリット・デメリットにも留意して調査した。

### **調査方法**

- ・ インターネット及び刊行物を利用した情報収集
- ・ 関係者とのヒアリング
- ・ ICT イベントの視察

関係者のヒアリングに関しては、ドイツの物理工学研究所、フェルディナンド・ブラウン高周波研究所、マックスプランク・ポリマーリサーチ研究所、ベルギーの ETRO にインタビュー調査を実施し、その議事録を本報告書に収録した。ICT イベントには、2013年10月6 - 11日に開催された欧州マイクロ波週間のテラヘルツ技術のワークショップ

に参加したので、その模様をレポートとして本報告書に収録した。

なお、本報告書では、情報を入手したウェブサイトの URL を参考のため注に載せているが、これらの記事はサイト運営者の都合で随時移動、修正、削除される可能性がある。従って、本報告書の発表後、注に記された URL から情報源となった記事にアクセスできないことがありうることを、ここで前もって注記しておきたい。

**調査支援組織：ONOSO**

住所：2 Boulevard Anatole France, 92100, Boulogne-Billancourt, FRANCE

電話番号：01 46 03 06 53 (フランス国外から: 0033 1 46 03 06 53)

メールアドレス：k.ono@onosofr

担当：小野 浩太郎

## 報告書の要約

第一章では、欧州連合（EU）の第七次枠組計画（FP7）における研究助成及び研究開発動向を調査した。テラヘルツに関する研究プロジェクトは、特にマイクロ電子部品や光学技術に関する「課題 3：部品、システム、工学」（あるいは「部品、システムへの代替えパス」という名称）や、未来新興技術（FET：Futur Emerging Technologies）を募集している「課題 8」や「課題 9」で研究が助成されることが多い。採用基準や予算を定めた作業プログラムには、2009-2010 年度作業プログラムからテラヘルツという言葉が登場し始め、関心が高まりつつあることが伺える。

FP7 においては、電波天文学部門のプロジェクト（「TERACOMP」：プロジェクト名）を含め、多くのテラヘルツ関連のプロジェクトが実施されている。テラヘルツ向けの量子カスケードレーザ（「TERACOMB」）、超高速量子物理学（「ULTRAPHASE」）、半導体トランジスタ（「THzPowerElectronics」）、新素材グラフェンを使用した電子端末（「GRADE」）や、サブテラヘルツ帯での無線通信技術（「iPHOS」）、500GHz 帯及び 700GHz 帯向けの SiGe HBTs 技術（「DOTFIVE」、「DOTSEVEN」）、芸術作品の非破壊検査向けのテラヘルツカメラ（「INSIDDE」）、医療・生物・化学分析でのテラヘルツの利用（「ULTRA」）等がある。また、FP7 では、ICT 部門だけでなく、セキュリティ部門からも、テラヘルツやミリ波を利用するボディースキャナ技術の開発プロジェクト等に助成されている（「TERASCREEN」、「XP-DITE」、「IMSK」）。

第二章では、欧州主要国（英独仏）における研究助成機関の動向について記す。英国の工学・物理科学研究評議会、ドイツの連邦教育研究省とドイツ研究基金、フランスの



国立研究機構が、各国で ICT 部門を含めた研究開発助成を実施しており、テラヘルツ技術の研究プロジェクトも数多く進められている。

特に、注目されるのは、ドイツ連邦教育研究省が助成している「ミリリンク」プロジェクトである。同プロジェクトには、フラウンホーファー・応用固体状態物理学研究所 (IAF)、カールスルーエ技術研究院 (KIT)、シーメンス、Kathrein、ラジオメーターフィジックスが参加しており、電波リンクをブロードバンド光通信に統合し、電波と光通信間のシームレスな通信を可能にすることを目標としている。このため、同プロジェクトでは、200~280GHz 帯で大量のデータ転送を可能にする超小型電子回路を開発しており、2013 年 5 月には、伝送実験を 1km 離れた高層ビルの間で行い、240GHz 帯で最大 40Gbit/s のデータ転送に成功した。ついで、2013 年 10 月には、研究施設内で実験を行い、237.5GHz 帯を利用し、20m の距離で最大 100Gbit/s のデータ転送に成功した。

第三章では、英国、ドイツ、フランス、ベルギーにおける公的研究機関のテラヘルツ技術の研究開発体制及び研究活動動向について記す。

英国では、英国の 16 大学、5 つの国立研究所、13 の企業がテラヘルツに関連する研究や製品化を行っていると言われ、研究開発及び商用化が積極的に行われている。英国立物理研究所 (NPL) では、テラヘルツ波の計測、イメージング技術、セキュリティと生物・医療への応用等、包括的な研究が実施されている。大学機関では、インペリアル・カレッジロンドン大学に、2012 年 2 月にテラヘルツ科学・工学センターが創設された。これは大学内の複数の学科でばらばらに実施されていたテラヘルツ研究を統合する目的を持ち、英国におけるテラヘルツ研究への関心の度合いが伺える出来事である。同センターでは、テラヘルツアプリケーション向けの新素材と電磁波測定の研究、最先端機

能素材とマイクロ/ナノ製造処理技術に基づくパッシブな部品とアクティブな端末の研究、生物光学、セキュリティ、国防部門向けに電気通信と電磁波センシングの新アプリケーションの開拓、EMC・ミリ波とテラヘルツ光学・端末/回路シミュレーションと計量学の学際的な教育と研修を実施しており、研究者の育成も含め、包括的な研究活動が実施されている。なお、公的機関ではないが、英国のテラビュー社は、テラヘルツの発生源と検出器の製品化やテラヘルツ光の応用研究を行い、特に、セキュリティ、医薬品、自動車、ソーラーパネル、医療、絵画や手書き本等の非破壊検査向けに応用開発を実施しており、研究機関にテラヘルツの機器を供給している。

ドイツでも非常に多くの機関でテラヘルツ技術の研究開発が実施されている。物理工学研究所 (PTB) では、テラヘルツの計測研究や国家標準の策定活動を実施している。同研究所の高周波計測技術作業グループ (WG2.22) では、110 GHz を上限とするパワー、減衰量、インピーダンスに関する標準化活動が実施されている。また、PTB はブラウンシュバイク工科大学とテラヘルツ通信研究所という機関を設立し、次世代高速無線通信技術の研究を実施している。マイクロ波と光電子工学の研究開発を主に実施しているフェルディナンド・ブラウン高周波研究所 (FBH) でも、テラヘルツ技術の研究が実施されており、イメージングシステムや 300~500GHz 帯の無線通信システムの研究開発が実施されている。マックスプランク・ポリマーリサーチ研究所では、テラヘルツの研究に関して二つのグループが設置されており、第一のグループでは分光法、第二のグループでは、テラヘルツのセンシングの研究及び光回線とテラヘルツを組み合わせる研究を実施している。以上の他、フラウンホーファー・応用固体物理研究所 (IAF) とカールスルーエ工科院 (KIT) は、先に触れた「ミリリンク」プロジェクトを実施している。

フランスでも複数の機関がテラヘルツの研究を実施している。ポリテクニク工科大学の光学・生物科学研究所で、テラヘルツを利用する生物イメージングの研究開発を実施している。パリ第七大学の素材・量子現象研究所では、カスケードレーザ、テラヘルツの発生と検出、テラヘルツ技術と電気通信技術の融合をテーマに研究を行っている。モンペリエ第二大学では、テラヘルツ技術の研究が20年以上に渡って実施されており、フランスの国内外の組織が参加するテラヘルツ研究グループネットワーク、GDR 2987「THz 周波数帯の半導体ソースと検出器」を設立している。ボルドー第一大学に設置されたアキテーヌ波動・物質研究所 (LOMA) では、テラヘルツの光源、テラヘルツイメージング技術、その他、分光法に関する基礎研究が実施されている。特に、THz-TDSの研究を実施しており、150GHz~4THz 帯を利用している。電子情報技術研究所 (LETI) では、テラヘルツに関して、特にイメージング技術に関して、赤外線や可視光線、ミリ波、X線とともに研究開発が実施されている

ベルギーでは、IMEC と ETRO (ブリュッセル自由大学工学部電子工学・情報学科) がテラヘルツを積極的に研究している。ETRO では特に応用研究を実施している。両機関は提携し、BISENS (ブリュッセル統合センサー研究所) という共同研究組織を創設し、ミリ波及びテラヘルツ (30GHz~3THz 帯) の統合センサーの研究を実施している。

以上のように、欧州諸国ではテラヘルツ技術に関する様々な研究が実施されているが、無線通信への応用に関しては、ドイツの研究機関 (ミリリンクプロジェクト、ブラウンシュバイク工科大学、FBH、マックスプランク・ポリマーリサーチ研究所) で多くの研究が実施されている。

第四章には、2013年10月初頭にドイツのニュルンベルクで開催された欧州マイクロ

波週間 (EuMW) におけるテラヘルツ技術のワークショップの視察レポートを収録した。このワークショップには、欧州を中心として、日本も含めて世界各国からテラヘルツ技術の研究者が集まり、それぞれ研究発表を行った。欧州のテラヘルツ技術に関しては、テラヘルツのイメージング・レーダ (スペイン・マドリッド工科大学)、MMIC 関連 (スウェーデン・チャールマス工科大学とフェルディナンド・ブラウン高周波研究所 (FBH))、テラヘルツセンシングとイメージング (独ゲーテ大学)、240GHz 帯での二点間高速通信 (シュツットガルト大学 : ミリリンクプロジェクトの延長)、人体セキュリティスキャナー (スペイン・アルファ・イメージング社)、航空部品の検査 (ベルギー・王立軍事大学)、水分中のバイオセンシング (ベルギー・ETRO) の発表があった。

第五章では、欧州におけるテラヘルツ帯の利用割当とテラヘルツ技術の標準化動向について記す。利用割当に関しては、テラヘルツ帯の一部 (275GHz~3000GHz) の世界的な利用割当はまだ決定していない。欧州郵便・電気通信主管庁会議 (CEPT) の欧州通信庁 (ECO) によれば、現在、国際電気通信連合の電波部門 (ITU-R) の WP 1A (Working Party 1A) は、275GHz - 1000GHz 範囲で働く能動業務の技術・運用の諸特性を研究しており、新しい ITU-R SM 報告書「THz トレンド」(「275GHz 以上の周波数帯の能動業務に関する技術トレンド」) の予備草稿へ向けた作業資料と 275GHz - 1000GHz 範囲で働く能動業務の技術・運用の諸特性に関する新研究課題案草稿への寄与を検討し、その草稿を準備している。2012 年度世界電波通信会議 (WRC-12) では、国際周波数分配の脚注 5.565 が改訂された。受動業務の利用は 3000GHz 帯まで拡大され、275 - 3000GHz 範囲の受動業務による利用は、能動業務による利用を妨げてはいけず、また、能動業務により 275 - 1000GHz 範囲の利用を望む主管庁は、有害な混信から受動業務を保護する

ため、実行可能なあらゆる措置を取ることを要請される、と改訂された。標準化活動に関しては、例えば、ドイツでは国家標準を PTB で策定中であるが、欧州電気通信標準化機構 (ETSI) で、欧州で統一的な標準の策定はまだ行われていないようである。欧州の研究者にヒアリング調査を行い、標準化に関する質問を投げかけたが、「知らない」、もしくは「欧州で統一的な動きはない」と答える研究者ばかりであり、有効な回答は得られていない。

また、欧州では「THzブリッジ (THz-Bridge)」(2001年2月～2004年1月:36ヶ月)というプロジェクトが実施され、テラヘルツ波を利用した生体システムの研究を実施するとともに、医療イメージングへの応用を考えて、テラヘルツ波の生体への曝露影響についての研究も行っている。

本調査では、欧州の研究者に対してヒアリング調査を実施し、研究開発現場の生の声を聞き、インターネットや刊行物による公開情報を利用した調査では知ることが難しい事情について質問した。

1) 「テラヘルツ波の定義は何か」という質問に対しては、ほとんどの研究者が 100GHz～10THz 帯と考えているが、中には 300GHz～3THz と回答した研究者もいる (独 PTB ベルリンの研究者の一人)。

2) 「ミリ波や赤外線等とテラヘルツを比較した際のメリット、デメリットは何か」という質問に対しては、以下の回答をいただいた。

- ・ 独 PTB ブラウンシュバイクの研究者：テラヘルツの長所：帯域、解像度。短所：利用するのに必要なパワーが確保できないこと、自由な空間の伝搬ロスが大きいこと、信号に対するノイズの割合が大きいこと、技術的な問題

- ・ ベルギー・ETRO の研究者：「長所は、透過度と解像度。透過度と解像度の関係は相反しており、赤外線は解像度が高いが透過度がほとんどない一方、ミリ波は透過度が高いが解像度がほとんどなく、テラヘルツ波はその間に位置し、透過度と解像度のバランスが取れている」

3)「アメリカでは軍事部門でテラヘルツ研究に助成されていると言われることが多いが、欧州の研究開発の特徴、強みとは何か」という質問に対しては、以下の回答をいただいた。

- ・ 独 PTB ベルリンの研究者：「欧州での推進力は大学、小企業、スピンオフ企業」
- ・ 独 FBH の研究者：「米国は DARPA 等の国防関係から多くの研究費が来る。一方、欧州では研究開発を所管する省庁から助成されることが多く、市民向けのアプリケーションの開発に特色があり、国防には費やさない」
- ・ 独マックスプランク・ポリマーリサーチ研究所の研究者：「欧州で THz 研究が軍事利用と関係して実施されていると聞いたことがない。私の意見では、THz 放射を利用する基礎物理学は欧州の THz 研究の強みの 1 つであり、これは天文学から超高速光電子工学も含む。この他に、欧州の研究の強みの 1 つは、センシングと計量学である」
- ・ ベルギー・ETRO の研究者：「欧州の強みは、①TDS（時間領域分光法）、②量子カスケードレーザ、③ボディスキャナ（100～500GHz）、④宇宙関係（ESA の存在が大きい）」

欧州におけるテラヘルツ研究の強みに関しては、研究者毎に様々な回答が得られたが、軍事部門での研究開発は積極的ではないことが分かる。

以上の他、テラヘルツの通信技術への応用としては、マックスプランク・ポリマーリサーチ研究所の研究員がピコセル、データセンターへの利用を見込んでいると回答いただいた。以下に引用する。

- ・ 「テラヘルツ波はピコセルに有用であり、データセンターにも活用しようとしている。現在のサーバ・ラックの後部は、光ファイバ回線がたくさん張りめぐらされている状態だが、これを、テラヘルツ波を用いてワイヤレスにしたい。テラヘルツ波は近距離では大変有効なので、サーバ・ラック間でテラビット級を実現し、

グーグル、イーベイ、アマゾン等に使ってもらいたいと考えている。しかし、彼らは研究費を支援してくれる訳でなく、実現したら購入しようという方針なので、研究協力の相手を探している。ポータブルなデータ・キオスクを実現し、映画やDVDのダウンロードに有効である」

以上が報告書全体の要約である。情報の詳細に関しては、報告書本文を参考していただきたい。

## **第一章 欧州連合の第七次枠組計画におけるテラヘルツ技術の研究開発助成及び研究開発活動動向**

### **第一節 FP7 ICT 作業プログラムにおけるテラヘルツ技術の支援動向**

FP7 ICT 作業プログラムは、2007年のFP7開始年度より2年毎に（2013年は1年）作成されており、公募する研究プロジェクトの採用基準や予算等の概要を定めている。

テラヘルツ波に関する研究開発については、FP7 ICT 作業プログラムの特にマイクロ電子部品や光学技術に関する「課題3：部品、システム、工学」（あるいは「課題3：部品、システムへの代替えパス」という名称）や、未来新興技術（FET：Futur Emerging Technologies）を募集している「課題8」や「課題9」で研究が助成されることが多い。

2007-2008年度作業プログラムには、テラヘルツという言葉は登場することはないが、2009-2010年度作業プログラム（「課題3：ICT-2009.3.2：半導体部品のデザインと電子工学に基づく小型化システム」）以来、2011-2012年度作業プログラム（「課題3：ICT-3.5：コア・分裂フォトニック技術」）、2013年度作業プログラム（「課題7：ICT-2013.10.1：EU日本研究開発協力」）に現れており、公募の対象として認知されるようになり、注目が集まりつつある。

### 参考：FP7 ICT「課題3」の予算

- ・ 2007-2008 年度作業プログラム：課題3の全予算：4億3400万ユーロ
- ・ 2009-2010 年度作業プログラム：課題3の全予算：3億7500万ユーロ  
課題3.2：半導体部品のデザインと電子工学に基づく小型化システム：予算2500万ユーロ
- ・ 2011-2012 年度作業プログラム：課題3の全予算：4億200万ユーロ  
課題3.5：コア・分裂フォトニック技術：予算1億1700万ユーロ
- ・ 2013 年度作業プログラム：課題3の全予算：2億2950万ユーロ  
☆これらの予算はテラヘルツ技術への助成だけではない。

なお、FP7は2013年末で終了予定であり、2014年からは「ホライゾン2020」という名称で大型研究開発助成プログラムが開始予定である。2011年11月の欧州委員会の発表では、期間は2014年から2020年までの7年間で、全予算としては約800億ユーロが提案されている<sup>3</sup>。具体的な公募要件を定める作業プログラムは、2013年12月に策定予定であり、テラヘルツ技術への詳しい助成動向はまだ明らかになっていない。だが、「部品とシステム」が主要な公募枠として決定されており<sup>4</sup>、この枠内でテラヘルツ技術に関しても助成が行われると考えられる。

## 第二節 FP7 ICT 部門のテラヘルツ技術の研究プロジェクト事例

ついで、FP7におけるテラヘルツ技術の研究プロジェクトの事例について記す。特に、電波天文学等のプロジェクト<sup>5</sup>ではなく、テラヘルツ波のアクティブな利用を目的とす

<sup>3</sup> [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-11-1475\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-11-1475_en.htm)

<sup>4</sup> [http://ec.europa.eu/research/horizon2020/index\\_en.cfm?pg=competitive-industry](http://ec.europa.eu/research/horizon2020/index_en.cfm?pg=competitive-industry)

<sup>5</sup> 電波天文学に関わるテラヘルツ技術のプロジェクトとしては、「TERACOMP」がある。  
[http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=result.document&RS\\_LANG=IT&RS\\_RCN=13392357](http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=result.document&RS_LANG=IT&RS_RCN=13392357)



るプロジェクトを選択して記す。

## 「TERACOMB」プロジェクト（量子カスケードレーザ）

### 基本情報

略称	TERACOMB
正式名称	量子カスケードレーザベースのテラヘルツ周波数コム
公募分野	FP7-ICT-2011.9.1
研究期間	2012年6月-2015年5月（36ヶ月）
全予算（EU 拠出金）	277万ユーロ（211万ユーロ）
ウェブサイト	<a href="http://www.teracomb.eu">http://www.teracomb.eu</a>
プロジェクトコーディネーター	ウィーン工科大学（オーストリア）
プロジェクト参加者	パリ第七大学（仏）、理論・応用光学研究院（仏）、ケンブリッジ大学（英）、チューリッヒ連邦工科大学（スイス）、MENLO システム（独）

### 研究内容

テラヘルツ周波数コム（THz frequency combs）を安定した仕方で発生させる小型で強力な量子カスケードレーザ及び検出器の研究開発を実施する。研究目標は、1THz 帯ブロードバンドで規則的なコム THz 量子カスケードレーザによる連続波の証明、1THz 帯ブロードバンドで THz 周波数コムのための量子カスケードレーザベースの増幅器の開発、Sub-ps pulses を発生するモードロック量子カスケードレーザベースの 1THz 帯ブロードバンド周波数コム確立、コヒーレントサンプリングの時間解析度と電子・光検

出の感度の増大である。

なお、プロジェクトコーディネーターのウィーン工科大学には、THz研究所<sup>6</sup>が設置されており（人員は15名程）、THz量子カスケードレーザの他、THz-TDS、新素材の研究を実施している。

## 「ULTRAPHASE」プロジェクト（超高速量子物理学）

### 基本情報

略称	ULTRAPHASE
正式名称	振幅と位相における超高速量子物理学
公募分野	FP7-IDEAS-ERC
研究期間	2012年4月～2017年3月（60ヶ月）
全予算（EU 拠出金）	249万ユーロ（249万ユーロ）
ウェブサイト	<a href="https://scikon.uni-konstanz.de/en/projects/2149/">https://scikon.uni-konstanz.de/en/projects/2149/</a>
プロジェクトコーディネーター	コンスタンス大学（独）

### 研究内容

固体中の電子のダイナミクスと移動における高速量子揺動運動（oscillatory motion）の確立、光と物質の強力に結びついたシステムの非断熱的摂動後に発生するとされる非古典的光放射の研究、光の半周期よりも遥か下で解像度の高い分析を可能にする新型位相ロックマルチテラヘルツパルスによって供給される極端に高い一時的な電子あるいは磁波バイアスの下での固体の電荷とスピン電子特徴の観察とコントロール、中赤外線

<sup>6</sup> <http://thzlabs.tuwien.ac.at>

における解像されたフィールドのフォトン-反響の研究を実施している。

プロジェクトコーディネーターのコンスタンス大学の物理学科には、「超高速現象とフォトニクス講座」<sup>7</sup>が設置され、テラヘルツの研究が実施されている。また、同大学にはフォトニクス応用研究センターが設置されており、シーメンス等を含めた民間企業と提携して、技術移転を行い、また、大学の他学部と連携して、学際的な研究を実施している。テラヘルツに関しては、100 MV/cmと 30 Teslaを可能にするテラヘルツ光源を開発している。

### 「LIGHTER」プロジェクト (テラヘルツ分光法)

#### 基本情報

略称	Lighter
正式名称	非線形テラヘルツ分光学により研究されるクリティカルタイムスケールにおける光と物質
公募分野	FP7-PEOPLE-2012-CIG
研究期間	2013年3月-2017年2月 (48ヶ月)
全予算 (EU 拠出金)	10万ユーロ (10万ユーロ)
ウェブサイト	<a href="http://cordis.europa.eu/projects/rcn/107317_en.html">http://cordis.europa.eu/projects/rcn/107317_en.html</a>
プロジェクトコーディネーター	マックスプランク協会 (独) :ポリマーリサーチ研究所

<sup>7</sup> <http://cms.uni-konstanz.de/en/physik/leitenstorfer/research/multi-terahertz-physics-and-technology/>

## 研究内容

LIGHTERプロジェクトでは、有機、無機半導体におけるキャリアダイナミクス、THz信号の超高速スイッチングとモデレーション、スピンの超高速コントロール、超高速ファイバレーザ、非線形ファイバ光学（生物光学のアプリケーションとともに）等を研究している<sup>8</sup>。

☆LIGHTERプロジェクトを実施しているマックスプランク・ポリマーリサーチ研究所に、ヒアリングを行い、本報告書第三章第二節にその議事録を収録したので、参考にしていただきたい

## 「THzPowerElectronics」プロジェクト（半導体トランジスタ）

### 基本情報

略称	THzPowerElectronics
正式名称	ハイパワーテラヘルツ電子回路のための技術
公募分野	FP7-PEOPLE-2012-CIG
研究期間	2013年4月-2017年3月（48ヶ月）
全予算（EU拠出金）	10万ユーロ（10万ユーロ）
ウェブサイト	<a href="http://cordis.europa.eu/projects/rcn/107692_en.html">http://cordis.europa.eu/projects/rcn/107692_en.html</a>
プロジェクトコーディネータ	FORSCHUNGSVERBUND BERLIN：フェルディナント高周波研究所（独） <sup>9</sup>

8

[www.mpip-mainz.mpg.de/thz](http://www.mpip-mainz.mpg.de/thz)  
[www.ultrafast.dk](http://www.ultrafast.dk)

<sup>9</sup> フェルディナント・ブラウン高周波研究所は、FORSCHUNGSVERBUND BERLINを構成する1つの研究院である。

## 研究内容

☆THzPowerElectronicプロジェクトを実施しているフェルディナンド高周波研究所のニルス・ウエイマン博士にヒアリングを行い、同プロジェクトの要点を説明していただき、本報告書第三章第二節にその議事録を収録した。以下に、議事録から氏の説明を引用する。

「(THzPowerElectroni プロジェクトは) 自分の研究しているテラヘルツ波や光発生よりも電子工学の研究に近く、半導体トランジスタプロセスを開発している。トランジスタをポリマーに組み込み、基板の上に置かない。基板を利用すると、高周波ではロスが多くなる。以上の理由で、半導体基板を取り除き、全ての要素を例えば窒化アルミニウム (AlN) のセラミックの上に置き換えている。このようにして、ロスを減少させることができる。我々は2つのフレーバーを持ち、トランジスタを窒化アルミニウムのキャリアと IHP と開発しているシリコン・ゲルマニウム・バイシーモス (SiGe BiCMOS) ウェハの上に置いている。ここのクリーンルームでは、マイクロストリップラインを信号伝達のために開発している。

以上が同プロジェクトの原理的な部分であるが、現在我々は 400GHz のデバイスを開発しており、200GHz まで可能である。同プロジェクトでは、2年後ぐらいには  $0.2\mu\text{m}$  で 700GHz を目標としている。下方 (の土台部分) を広くして、その上で上下から挟んで接続部分を狭くする方法もあれば、当方では、上下から挟んで接続部分を狭くし、下方 (の土台部分) はコネクタとしてそれほど広くしていない。現在は  $0.8\mu\text{m}$  で 400GHz だが、これを  $0.4\mu\text{m}$  で 550GHz に持っていき、最終的には  $0.1\mu\text{m}$  で 500GHz に持っていきたい。同技術のアプリケーションとしては、通信ではなく、イルミネーション・イメージング等に使用できるようになると思う。ダイオード等で三重化することとしており、最終的にテラヘルツ帯域に到達する。これにより、出力は弱まり、ノイズが小さく

なり、ワイヤレスの基地局やビル間などに使えるであろう。パワーアンプ(出力増幅器)は、450~500GHz であり、発信側の幅が 0.1  $\mu\text{m}$  である」

## 「GRADE」プロジェクト (電子デバイス)

### 基本情報

略称	GRADE
正式名称	RF アプリケーション向けのグラフェンベースの端末と回路
公募分野	ICT-2011.3.1
研究期間	2012 年 10 月-2015 年 9 月 (36 ヶ月)
全予算 (EU 拠出金)	513 万ユーロ (365 万ユーロ)
コーディネーター	ジーゲン大学 (独)
参加組織	王立技術研究院 (スウェーデン)、国立ナノ電子工学間大学 コンソーシアム (伊)、リール第一大学 (仏)、Infineon Technologies (独)、ボルドー大学 (仏)、IHP (独)
ウェブサイト	<a href="http://www.grade-project.eu/index.php?id=291">http://www.grade-project.eu/index.php?id=291</a>

### 研究内容

同プロジェクトでは、テラヘルツ帯向けの新型グラフェンベース電子端末に関わる 2 つのコンセプトに関わる概念実証を研究している。1 つは、グラフェンを高移動トランジスタチャンネルとして利用する GFET (Graphene Field Effect Transistors) であり、もう 1 つは、グラフェンを 2 つの絶縁するレイヤーの間に挟んで利用する新型熱電子端末の GBT (Graphene Base Transistors) である。以上、2 つの技術コンセプトのアプリケー

ションとしては、通信、自動車、セキュリティ、環境モニタリングを想定している。例えば、通信速度 100Gbit/s 以上の低電力無線通信システムや、危険物の発見に利用するテラヘルツセンサーが応用技術として考えられる。

プロジェクトコーディネーターのシーゲン大学では、グラフェンベースのナノ技術を研究している。

### 「iPHOS」プロジェクト (受信器と超高速通信システム)

#### 基本情報

略称	iPHOS
正式名称	広帯域無線通信のためのサブテラヘルツ波帯における統合 フォトニックトランシーバー
公募分野	ICT-2009.3.9
研究期間	2010年6月-2013年11月 (42ヶ月)
全予算 (EU 拠出金)	447万ユーロ (309万ユーロ)
コーディネーター	マドリッド・カルロス第三大学 (西)
参加組織	ベルリン工科大学 (独)、カレッジ・ロンドン大学 (英)、 ケンブリッジ大学 (英)、ACST (独)、タレスシステム (仏)、 アイントフォーヘン工科大学 (独)、III V 研究所 (仏)、 デュイスブルグ・エッセン大学 (独)
ウェブサイト	<a href="http://www.iphos-project.eu/consortium">http://www.iphos-project.eu/consortium</a>

#### 研究内容

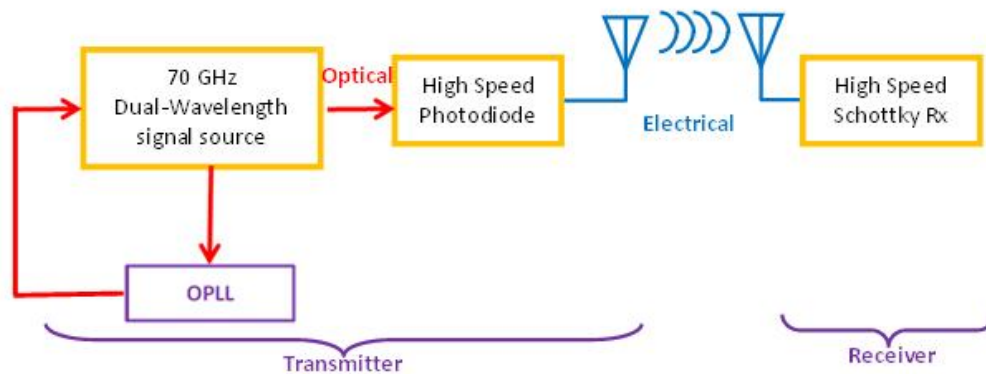
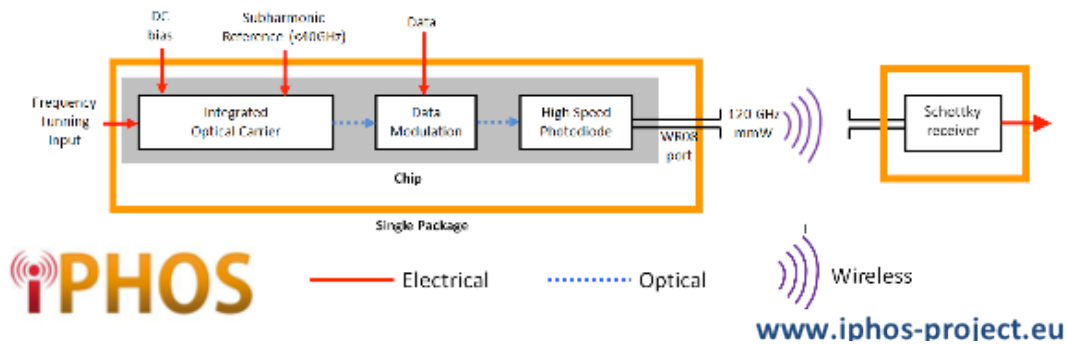
iPHOS では、光技術を利用して、サブテラヘルツ帯向けの無線通信を可能にする小型

低電力受信器と短距離超高速データ通信への応用技術を開発している。特に、100GHz以上の周波数帯を利用することが見込まれている。応用技術に関しては、特に空港内での使用が想定されている。

## 図版







出典 iPHOS プロジェクトのウェブサイト

なお、iPHOSは、IPHOBAC<sup>10</sup>というFP6 プロジェクトの後継プロジェクトである。IPHOBACでは、30～300GHz帯の統合フォトニック機能を電気通信システム、セキュリティ等に応用する研究が実施された。(IPHOSBAC：2003年6月より3年間：全予算1100万ユーロ（EU拠出分：570万ユーロ）：コーディネーター デュイスブルグーエッセン大学)

### 「DOTFIVE」プロジェクト及び「DOTSEVEN」プロジェクト（回路）

#### 基本情報

略称	DOTFIVE
正式名称	0.5 テラヘルツシリコンゲルマニウムヘテロ接合バイポーラ

<sup>10</sup> <http://www.ist-iphobac.org/introduction/index.asp>

	技術へ
公募分野	ICT-2007.3.1
研究期間	2008年2月-2011年1月(36ヶ月)
全予算(EU 拠出金)	1474万ユーロ(969万ユーロ)
コーディネーター	ST マイクロエレクトロニクス(仏)
参加組織	アルマ・コンサルティンググループ(仏)、パリ第十一大学(仏)、ミュンヘン連邦軍大学(独)、Infineon Technologies(独)、XMOD テクノロジーズ(仏)、ヴッパータール大学(独)、IHP マイクロエレクトロニクス(独)、リンツ大学(オーストリア)、ボルドー工科院(仏)、ST マイクロエレクトロニクス・クロール(仏)、ジーゲン大学(独)、IMEC(ベルギー)、ナポリ・フェデリコ二世大学(伊)、ドレスデン工科大学(独)
ウェブサイト	<a href="http://www.dotfive.eu/">http://www.dotfive.eu/</a>

略称	DOTSEVEN
正式名称	0.7 テラヘルツシリコンゲルマニウムヘテロ接合バイポーラ技術へ
公募分野	ICT-2011.3.1
研究期間	2012年10月-2016年3月(42ヶ月)
全予算(EU 拠出金)	1228万ユーロ(860万ユーロ)

コーディネーター	Infineon Technologies (独)
参加組織	アルマ・コンサルティンググループ (仏) 、ドレスデン工科大学 (独) 、DICE DANUBE 統合回路工学 (オーストリア) 、ナポリ・フェデリコ二世大学 (伊) 、RWTH アーヘン大学 (独) 、リンツ大学 (オーストリア) 、IHP マイクロエレクトロニクス (独) 、XMOD テクノロジーズ (仏) 、ボルドー第一大学 (仏) 、TREBAX (スウェーデン) 、SIVERS IMA AKITIEBOLAG (スウェーデン) 、ヴッパータール大学 (独) 、デルフト工科大学 (蘭)
ウェブサイト	<a href="http://www.dotseven.eu/">http://www.dotseven.eu/</a>

## 研究内容

DOTFIVE プロジェクトは、ミリ波アプリケーションのために、SiGe HBTs (Silicon-Germanium Heterojunction Bipolar Transistors) を開発するプロジェクトである。特に、室内温度で、最大 500GHz 帯で作動する SiGe HBTs を証明すること、統合ミリ波回路の作動を評価することを目的とする。

DOTSEVEN は、DOTFIVE の後継プロジェクトであり、室内温度で、最大 700GHz 帯で利用可能な SiGe HBTs 技術を開発すること、HBT を利用するミリ波、サブミリ波の回路のデザインを証明すること、高速端末と回路で生じる物理効果の評価、理解、モデリングを行うことである。同プロジェクトでは、新しい回路を利用した低燃費・低コストのテラヘルツの応用技術の開発も視野にいれており、特に高速通信、レーダーアプリケーション、ミリ波・テラヘルツ波によるイメージング技術、センシング技術への応用

が構想されている。

DOTFIVE プロジェクトのコーディネーターの ST マイクロニクス、DOTSEVEN プロジェクトのコーディネーターの Infineon Technologies とも、欧州の半導体大企業であり、技術開発から商用化、製品化への移行が重視されていると考えられる。また、両プロジェクトとも、全予算が 1000 万ユーロを超える大型プロジェクトである。

### 「INSIDDE」プロジェクト（芸術作品向けテラヘルツカメラ）

#### 基本情報

略称	INSIDDE
正式名称	芸術作品における隠れた要素のイメージング、検出、デジタル化向け技術ソリューションの統合
公募分野	ICT-2011.8.2
研究期間	2013 年 1 月-2015 年 12 月（36 ヶ月）
全予算（EU 拠出金）	364 万ユーロ（290 万ユーロ）
コーディネーター	TreeLogic（スペイン）
参加組織	地域歴史博物館（ブルガリア）、Doerner 研究院（独）、3Dダイナミクス（ベルギー）、ITMA 技術センター（スペイン）、オビエド大学（スペイン）、国家研究評議会（伊）、デルフト工科大学（蘭）
ウェブサイト	<a href="http://www.insidde-fp7.eu/">http://www.insidde-fp7.eu/</a>

## 研究内容

テラヘルツ波技術を利用して、芸術作品の未知の部分のイメージングや 3Dモデリングを行う。140GHz～1.1THzのテラヘルツ発信器と受信器、自動フォーカシングシステム、テラヘルツ画像の自動分析ソフトウェア等を開発する。研究成果は、欧州の文化財や本、映画、テレビ等の検索ポータルサイト「ヨーロッパアーナ (Europeana)」<sup>11</sup>に統合される。プロジェクト内のテラヘルツ技術の研究部分に関しては、オビエド大学電気工学部信号理論と通信グループで研究が進められている。

## 「ULTRA」プロジェクト（医療・生物・化学分析向けテラヘルツアプリケーション）

### 基本情報

略称	ULTRA
正式名称	小型 Lab-on-Chip アプリケーションにおけるテラヘルツ高速分析のための超高速電子工学
公募分野	ICT-2007.3.6
研究期間	2008年6月-2011年11月（42ヶ月）
全予算（EU 拠出金）	441万ユーロ（290万ユーロ）
コーディネーター	フィリップ・エレクトロニクス（蘭）
参加組織	原子エネルギー・代替エネルギー庁（仏）、シーゲン大学（独）、マイクロ・テック（独）、ウプサラ大学（スウェーデン）、物質基礎研究基金（蘭）

<sup>11</sup> <http://www.europeana.eu/>

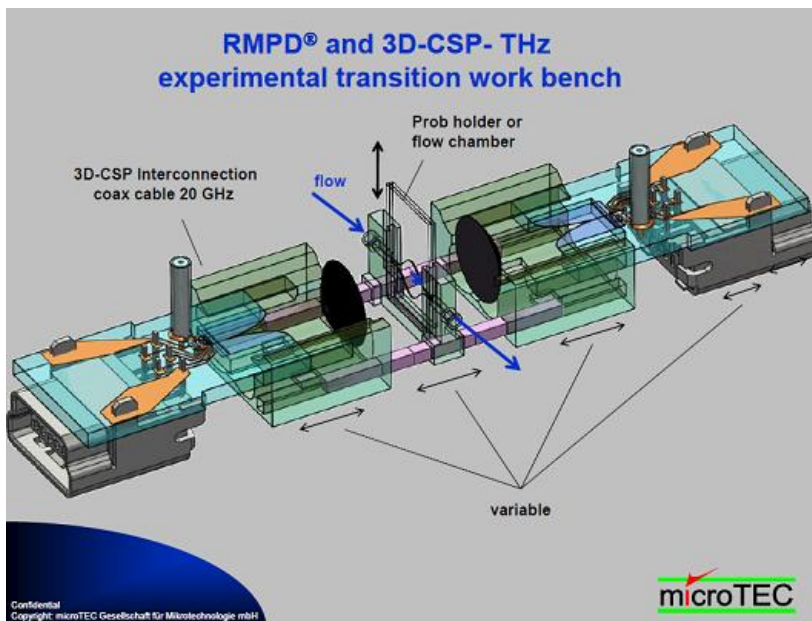
ウェブサイト

<http://www2.teknik.uu.se/ultratc/Partners.asp>

## 研究内容

テラヘルツを利用する医療、生物、化学分析と検出のためのアプリケーションを開発する。テラヘルツとプラスモニックス技術を単一の Lab-on-Chip マイクロシステムへと合流させる。また、低コスト、小型 THz イメージャー、THz スペクトロメーターを開発しており、トランスミッターは 200GHz 以上で作動する。

## 図版



出典 ULTRA プロジェクトのウェブサイト

### 第三節 FP7 セキュリティ部門のテラヘルツ技術の研究開発動向

以上、FP7 ICT部門で助成されている研究プロジェクトについて記したが、FP7 のセキュリティ部門でも、テラヘルツ技術の研究プロジェクトが助成されている。同技術は

非侵襲性の検査にも応用できるので、空港や国境地帯での危険物チェックシステム等の一部として研究開発が進められているからである。このような研究には、「TERASCREEN」プロジェクト<sup>12</sup>、「XP-DITE」<sup>13</sup>プロジェクト、「IMSK」<sup>14</sup>プロジェクトがあり、人体スキャナー等の研究が実施されている。

- ・ TERASCREEN（正式名称：国境チェックマルチ周波数マルチモードテラヘルツスクリーニング）：研究期間 2013.5 – 2016.10（30 ヶ月）：全予算（EU 拠出分） 487 万ユーロ（348 万ユーロ）：プロジェクトコーディネーター アルファ・イメージング（スペイン）：参加者 12 組織
- ・ XP-DITE（加速されたチェックポイントデザイン統合テストと評価）：2012.9 – 2017.3（54 カ月）：1461 万ユーロ（999 万ユーロ）：TNO（蘭）：13 組織
- ・ IMSK（統合モバイルセキュリティキット）：2009.3-2013.2（48 ヶ月）：2353 万ユーロ（1486 万ユーロ）：SAAB AKTIEBOLAG（スウェーデン）：29 組織

☆XP-DITE と IMSK に関しては、予算はプロジェクト全体に対する予算であり、テラヘルツ研究開発のみへの予算ではない。

「TERASCREEN」プロジェクトと「XP-DITE」プロジェクトに参加しているスペインのアルファ・イメージング社<sup>15</sup>は、軍事部門向けにミリ波技術を研究している。同社は 2006 年に GATE 社（スペイン）と英リーディング大学のミリ波の研究者により創設され、特に受動ミリ波を利用したスタンドオフ・人体スキャナーを開発し、実用化している。同社の機器は、受動ミリ波を利用するので、X線機器のように人体に有害な影響がない。同社は、EU の FP7 プロジェクトに参加するだけでなく、北大西洋条約機構 (NATO)

<sup>12</sup> [http://cordis.europa.eu/projects/rcn/108442\\_en.html](http://cordis.europa.eu/projects/rcn/108442_en.html)

<sup>13</sup> [http://cordis.europa.eu/projects/rcn/104801\\_en.html](http://cordis.europa.eu/projects/rcn/104801_en.html)

<sup>14</sup> [http://www.imsk.eu/IMSK\\_BLACK/HOME/tabid/68/Default.aspx](http://www.imsk.eu/IMSK_BLACK/HOME/tabid/68/Default.aspx)

<sup>15</sup> <http://www.alfaimaging.com>

の2つの作業グループにも参加し（ミリ波・テラヘルツ作業グループとスタンドオフ爆発物検知作業グループ）、軍事部門向けにも研究開発を行っている。「IMSK」プロジェクトに参加しているフィンランドの研究開発機関VTTは、米空軍研究開発の欧州拠点から助成されて、テラヘルツカメラの研究を実施しており<sup>16</sup>、爆発物や麻薬物等の検知技術を開発している。

## **第二章 欧州主要国における公的研究助成機関のテラヘルツ技術への支援動向**

ついで、欧州主要国（英、独、仏）におけるテラヘルツ技術の研究開発への支援動向について記す。なお、英工学・物理科学研究評議会、独連邦教育研究省とドイツ研究基金、仏国立研究機構が助成しているテラヘルツ技術関連のプロジェクトをリストにして収録した。

### **第一節 英国**

#### **工学・物理科学研究評議会（EPSRC）**

工学・物理科学研究評議会<sup>17</sup>（EPSRC）は、英国のICT部門も含めた工学、物理科学系の主要な公的研究助成機関である。同機関は政府外公共機関（Non-departmental public body）であるが、資金はビジネス・イノベーション・技能省（BIS）から受けており、研究助成の予算は、1年間に約8億ポンドである。人員規模は約230名である。

同機関は数多くの研究助成テーマを設定し、助成しているが、テラヘルツ技術に関し

<sup>16</sup> <http://www.vtt.fi/newsletter/032007art04.jsp>

<sup>17</sup> <http://www.epsrc.ac.uk/Pages/default.aspx>



では、a)「RF (Radio Frequency) とマイクロ波デバイス」、b)「光電子工学デバイスと回路」、c)「光学デバイスとサブシステム」という研究テーマの下で、多くの研究プロジェクトに助成されている。

#### a) RF とマイクロ波デバイス

同研究テーマでは、主に電波、マイクロ波やミリ波、テラヘルツ帯を利用するアンテナや送信器、増幅器等の新型デバイスアーキテクチャのデザインと開発に関する研究を助成している<sup>18</sup>。特に、ウェブサイトでは、テラヘルツ技術研究の重要度が強調されており、関心の高さが伺える。また、同研究テーマでは、現在5つのテラヘルツ技術に係る研究プロジェクトが実施されている<sup>19</sup>。

#### 主な研究プロジェクト

研究タイトル	組織名	助成金	研究期間
高出力 THz 科学アクティブ準光学	STFC 研究所	4 万 6000 ポンド	2013.11-2016.10
高出力 THz 科学アクティブ準光学	クイーン・メアリー・ロンドン大学	46 万 5000 ポンド	2013.9-2016.8
0.1-1THz 範囲小型 MMIC テラヘルツ光源	グラスゴー大学	58 万 3000 ポンド	2013.3-2016.3
テラヘルツ範囲のための設計されたナノ構造共鳴トンネリング	リバプール大学	9 万 5000 ポンド	2013.4-2015.3
テラヘルツマイクロ機械化された共鳴装置超構造	バーミンガム大学	71 万 1000 ポンド	2010.6-2013.11

<sup>18</sup> <http://www.epsrc.ac.uk/research/ourportfolio/researchareas/Pages/rfmicrodev.aspx>

<sup>19</sup> <http://gow.epsrc.ac.uk/NGBOChooseTTS.aspx?Mode=ResearchArea&ItemDesc=RF+%26amp%3b+Microwave+Devices>

## b) 光電子工学デバイスと回路

同研究テーマは<sup>20</sup>、半導体ベースの構造、デバイス、レーザ、LED、フォトダイオード、増幅器、受信器の開発、また、UVや可視光線、IR、マイクロ波を利用するデバイスのデザイン、製作、処理を含む。同テーマでは、現在テラヘルツ技術に関する6つの研究プロジェクトが実施されている<sup>21</sup>。

### 主な研究プロジェクト

研究タイトル	組織名	助成金	研究期間
全半導体統合 THz-TDS	サウスハンプトン大学	27 万ポンド	2010.3-2013.12
コヒーレントテラヘルツシステム - 広範囲アプリケーションのためのテラヘルツシステム	カレッジ・ロンドン大学	656 万 8000 ポンド	2012.5-2017.4
シリコン基盤の室内温度テラヘルツ量子カスケードレーザ	ウォーリック大学	47 万 7000 ポンド	2010.10-2014.3
シリコン基盤の室内温度テラヘルツ量子カスケードレーザ	グラスゴー大学	64 万 3000 ポンド	2010.7-2013.12
シリコン基盤の室内温度テラヘルツ量子カスケードレーザ	リード大学	27 万 6000 ポンド	2010.9-2014.2
半導体ナノワイヤ向けのテラヘルツ分光法	オックスフォード大学	75 万 5000 ポンド	2009.12-2013.11

<sup>20</sup> <http://www.epsrc.ac.uk/research/ourportfolio/researchareas/Pages/optoelec.aspx>

<sup>21</sup> <http://gow.epsrc.ac.uk/NGBOChooseTTS.aspx?Mode=ResearchArea&ItemDesc=Optoelectronic+Devices+and+Circuits>

### c) 光学デバイスとサブシステム

同研究テーマでは、UVや可視光線、IR、マイクロ波を含むフォロンが単位であるデバイスのデザイン、モデリング、製作、処理の開発研究に助成している。また、同テーマでは、テラヘルツ技術に関わる7つの研究プロジェクトが実施されている<sup>22</sup>。

#### 主な研究プロジェクト

研究タイトル	組織名	助成金	研究期間
テラヘルツ量子カスケードレーザーのコヒーレントな検出と操作	リード大学	69万5000ポンド	2011-2016.9
モノリシック共鳴テラヘルツ検出器	グラスゴー大学	58万9000ポンド	2011.9-2015.3
高出力 THz-TDS のための量子カスケード増幅器	ケンブリッジ大学	63万7000ポンド	2012.1-2014.12
高出力 THz-TDS のための量子カスケード増幅器	サウスハンプトン大学	32万4000ポンド	2012.2-2015.2
テラヘルツ音響レーザー端末	ノッティンガム大学	62万1000ポンド	2009-10-2014.3
テラヘルツガス-ファイバフォトニクス	バス大学	68万3000ポンド	2012.11-2016.5
新型フォトミクサー端末に基づく小型ダイオードレーザーポンプ THz 光源	ダンデ大学	52万5000ポンド	2010.2-2014.1

22

<http://gow.epsrc.ac.uk/NGBOChooseTTS.aspx?Mode=ResearchArea&ItemDesc=Optical+Devices+and+Subsystems>

## 第二節 ドイツ

### ドイツ連邦教育研究省 (BMBF) とドイツ研究基金 (DFG)

ドイツでは、ドイツ連邦教育研究省<sup>23</sup><sup>24</sup>とドイツ研究基金がICT部門を含めた研究開発助成を行っている。前者は、ドイツの研究開発政策を所管しており、2006年から、同省は「最先端技術戦略 (High-Tech Strategy)」を策定し、2010年には2020年までを対象とする「ドイツのための最先端技術戦略 2020」を定めており、ICT、マイクロシステム、光技術、生産技術、素材技術、バイオ技術、ナノ技術、サービス産業がキー技術として定められている。同戦略の策定に伴い、ICT部門に関しては、「ICT2020 – 技術革新のための研究 - 」が策定されており、合計で15億ユーロが研究開発に助成される見込みである。

ドイツ研究基金<sup>25</sup>は、ドイツの科学研究助成のための非営利組織であり、公的行政機関ではないが、多くの資金を州政府と連邦政府から支給されている。だが、投票システムや規制プロセスにより、自己運営することが保証されている。対象分野は人文科学から自然科学までの全分野である。同組織の全予算は、23億ユーロ（2010年）である。同組織はテラヘルツに関する多くのプロジェクトに助成している<sup>26</sup>。

#### 主な研究プロジェクト

研究タイトル	組織名	研究開始年度
テラヘルツ検出器開発	ケルン大学	2011-

<sup>23</sup> <http://www.bmbf.de/en/>

<sup>24</sup> <http://www.bmbf.de/en/6618.php>

<http://www.iaf.fraunhofer.de/en/news-media/newsarchive/news-2013-10-15.html>

<sup>25</sup> <http://www.dfg.de/en/index.jsp>

<sup>26</sup> 助成金額についてはウェブサイトで公表されていない。

<http://gepris.dfg.de/gepris/OCTOPUS/;jsessionid=0B8E3B83FAAE62E64EC2A2D06B62DB93?context=projekt&findButton=Finden&keywords=criterion=terahertz&language=en&module=gepris&task=doSearchSimple>

テラヘルツフィールドによるナノ構造コントロール	コンスタンス大学	2008-
半導体のナノ構造によるテラヘルツ量子光学	コンスタンス大学	2008-
GaN フィールド効果トランジスタにおけるプラズマ波からテラヘルツ発信	FBH	2013-
一時的なナノフォトニック構造によるテラヘルツ放射のフェムト秒コヒーレントコントロール	マックスプランク・FHI	2013-
テラヘルツアプリケーションのための極薄機能 ALD フィルムを含む量子メカニカル端末コンセプト	ドレスデン工科大学	2013-
テラヘルツニアフィールド顕微鏡によるメタマテリアルにおける電磁波結合とウェーブガイディング	フライブルク大学	2013-
テラヘルツ検出器に基づく CMOS FET の分析デザインのための数的ツールキット	ベルク大学ヴッパータール	2012-
自己生成されるテラヘルツ放射と相対性理論光学	イエナ大学	2013-
高フィールド・テラヘルツ光源	レーゲンスブルグ大学	2011-
未来テラヘルツ通信システムのチャンネルモデリングとシステムデザイン	ブラウンシュバイク工科大学	2012-
量子光学とテラヘルツ分光法のための実験施設	マルクブルク大学	2013-
テラヘルツ音響-光学 -ナノからピコ技術へ	ドルトムント工科大学	2009-
2D と 3D トポロジカル絶縁体におけるテラヘルツとマイクロ波によって誘導される高周波非線形移動	レーゲンスブルグ大学	2013-
高フィールド・高帯域テラヘルツパルス	ゲーテ大学	2009-
歯の組織と血液のための赤外線とテラヘルツ分光法と、歯髄の血液の流れを光学検出により歯のバイタリティを評価する方法の開発	レーゲンスブルグ大学	2010-
サブ帯域の移動間の量子干渉性に基づく非侵襲性テラヘルツレーザ放射	フンボルト大学	2010-
テラヘルツ技術のためのネットワーク分析器	カイザースラウテルン大学	2008-
増大された解像度を持つ低コスト統合 SiGe 技術に基づく 3D テラヘルツカメラシステム	ベルク大学ヴッパータール	2011-

改善された THz 周波数領域磁気共鳴分光計の開発	ステュットガルド大学	2012-
---------------------------	------------	-------

### 研究プロジェクト事例：ミリリンクプロジェクトとその動向

ドイツ連邦教育研究省は、「次世代ブロードバンドアクセス網」という開発支援政策で、「ミリリンク (Millilink)」プロジェクトに 200 万ユーロを助成している (研究期間：2010 年 3 月～2013 年 3 月)<sup>27</sup>。同プロジェクトには、フラウンホーファー応用固体状態物理学研究所 (IAF) とカールスルーエ技術研究院 (KIT) という 2 つの研究機関とともに、シーメンス、Kathrein、ラジオメーターフィジックスという 3 つの企業が参加している。同プロジェクトの目的は、特に都市部外でブロードバンドサービスを提供するため、電波リンクをブロードバンド光通信に統合し、電波と光通信間のシームレスな通信を可能にすることである。このため、同プロジェクトでは、200～280GHz帯で大量のデータ転送を可能にする超小型電子回路 (高周波チップのサイズ：4×1.5 mm<sup>2</sup>) を開発している。

2013 年 5 月 16 日のKIT及びIAFのプレス発表によると<sup>28</sup>、伝送実験を 1km離れた高層ビルの間で行い、240GHz帯で最大 40Gbit/sのデータ転送に成功した。なお、IAFで同プロジェクトを指揮したイングマル・カルファス教授は、2013 年以来、ステュットガルト大学で同種の研究を続けている。

写真：ミリリンクプロジェクト (高層ビル間の実験)

<sup>27</sup> <http://www.vdivde-it.de/KIS/vernetzt-leben/photonsche-kommunikationsnetze/millilink>

<sup>28</sup> [http://www.kit.edu/visit/pi\\_2013\\_12950.php](http://www.kit.edu/visit/pi_2013_12950.php)

[http://www.iaf.fraunhofer.de/en/news-media/press\\_releases/press-2013-05-16.html](http://www.iaf.fraunhofer.de/en/news-media/press_releases/press-2013-05-16.html)



出典 KIT

ついで、2013年10月14日のKIT及びIAFの発表によれば<sup>29</sup>、研究施設内で実験を行い、237.5GHz帯を利用し、20mの距離で最大100Gbit/sのデータ転送に成功した。同実験で、電波信号は日本企業NTTエレクトロニクスが開発した「フォトン・ミキサー」と呼ばれるウルトラブロードバンドにより発生され、ミリリンクプロジェクトで開発された電子回路によって受信される。

写真：研究施設内の実験

---

<sup>29</sup> [http://www.kit.edu/visit/pi\\_2013\\_14082.php](http://www.kit.edu/visit/pi_2013_14082.php)



出典 KIT

### 第三節 フランス

#### 国立研究機構 (ANR)

フランスの高等教育・研究省の傘下にある国立研究機構<sup>30</sup>は、2005年に創設された研究開発助成機関である。様々な分野の科学や技術、社会経済学、人文科学まで幅広く、研究開発助成を行っている。なお、ICT部門は、エネルギー部門やバイオ・医療部門と並んで、重要なテーマの1つとして位置づけられている。ANRでもテラヘルツに関する多くの研究プロジェクトが助成されている<sup>31</sup>。

#### 主な研究プロジェクト

研究タイトル	組織名	助成金	研究期間
THz-超安定マイクロ波オシ	IPR,ARTEMIS、タレ	72万8000ユー	2011.12- 36ヶ月

<sup>30</sup> <http://www.agence-nationale-recherche.fr/>

<sup>31</sup> [http://www.agence-nationale-recherche.fr/sui-vi-bilan/votre-recherche/?tx\\_solr%5Bq%5D=thz](http://www.agence-nationale-recherche.fr/sui-vi-bilan/votre-recherche/?tx_solr%5Bq%5D=thz)



レーザー	ス	口	
爆発物の THz と赤外線分野のガス状態の実験計測と理論分析	EADS, LPCA	28 万 9000 ユー 口	2012.3- 36 ヶ月
空気上にフィラメントにより産出されたテラヘルツ	LOA	17 万 5000 ユー 口	2010.12- 36 ヶ月
セキュリティアプリケーションのための小型化された固体状態のヘテロダインテラヘルツ受信器	CNRS UMphy, Supelec, TRT, CNRS MPQ	70 万 2000 ユー 口	2011.12- 42 ヶ月
テラヘルツ・アンチモン化物レーザーの開発	IEZ/UM2, MPA, パリ 第十一大学	66 万 5000 ユー 口	2011.11- 44 ヶ月
量子カスケードレーザーのプロッキング	III-Vlab, LPCA, LPA, パリ南大学	56 万ユーロ	2013.1- 36 ヶ月
熱変換に基づく全光テラヘルツカメラのデザインと試作化	TREFLE, ALPhANOV	24 万 9000 ユー 口	2012.1- 24 ヶ月
テラヘルツ技術による医薬品偽造分析	PCIM, Horus Laser, ISL, PGUPD	74 万 2000 ユー 口	2013.1- 48 ヶ月
ガラスの中のサブテラヘルツフォノン	INSP, LCC, IEMN	22 万 9000 ユー 口	2011.10- 36 ヶ月
量子ドットにおける負荷とスピンのテラヘルツ操作	IEMN	33 万 9000 ユー 口	2011.11- 48 ヶ月
統合郵便供給チェーンセキュリティ	仏郵便局, LOMA, SPIKENET	181 万ユーロ	2011.9- 36 ヶ月

## 研究プロジェクト事例

### 基本情報

正式名称	統合郵便供給チェーンセキュリティ
公募部門	包括的セキュリティのためのシステム・ツールコンセプト

研究期間	2011年9月～（36ヶ月）
全予算	約181万ユーロ
プロジェクトパートナー	仏郵便局、アキテーヌ波動・物質研究所（LOMA）、SPIKENET
ウェブサイト	<a href="http://www3.inposec.eu/v03/?kn=1000616&amp;vid=726422670&amp;ly=lay41&amp;sn=100400&amp;nps=50&amp;unav=m100&amp;hl=PARTNERS">http://www3.inposec.eu/v03/?kn=1000616&amp;vid=726422670&amp;ly=lay41&amp;sn=100400&amp;nps=50&amp;unav=m100&amp;hl=PARTNERS</a>

#### 研究概要

郵便物の検査のため、THz-TDS を利用する物質分析システムとともに、X 線を利用する画像認識技術や追跡システムを開発する。なお、同プロジェクトは、ドイツと共同で実施されている。ドイツ側はドイツ連邦研究教育省が助成しており、独郵便局、ミュンスター大学、MIC ロジスティクスがプロジェクトに参加している。

### 第三章 欧州諸国の公的研究機関におけるテラヘルツ技術の研究開発体制及び研究活動動向

本章では、欧州諸国、特に英国、ドイツ、フランス、ベルギーにおけるテラヘルツ技術の公的研究機関の研究体制及び研究活動動向について記す。

#### 第一節 英国

英国では、多くの研究機関と大学研究機関で、テラヘルツに関わる研究が実施されている。インペリアル・カレッジロンドン大学にテラヘルツ科学・工学センターが 2012 年に創設された際のワークショップイベントの資料によれば、英国の 16 大学、5 つの国立研究所、13 の企業がテラヘルツに関連する研究や製品化を行っている<sup>32</sup>。本節では、国立物理研究所とインペリアル・カレッジロンドン大学のテラヘルツ科学・工学センタ

<sup>32</sup> <https://workspace.imperial.ac.uk/opticalandsemidev/Public/stepan/Background%20and%20Impact.pdf>

ーについて記す。

## 国立物理研究所 (NPL)

国立物理研究所 (NPL)<sup>33</sup>は、計量学及び計量技術の開発を目的とする国立の研究機関である。同機関は、英国立計量庁のために、「NPLマネジメント」というセルコグループの子会社によって運営されている (現行の契約は 2014 年 3 月まで)<sup>34</sup>。英国の首都ロンドン郊外に施設を持ち、500 名以上の科学者が勤務している。なお、NPLは 1900 年に創立が決定され、1902 年に創設された。

テラヘルツ波に関しては、電磁波部門<sup>35</sup>で包括的に研究活動が実施されている<sup>36</sup>。非破壊検査等に使用できるイメージング技術、テラヘルツ波測定向けの器具の使用、テラヘルツ波の計測 (パワー、波長、侵入長、屈折率、スキャッタリング、放射率)、標準化機関が作成する将来的な安全ガイドラインへの助言、テラヘルツ顕微鏡、セキュリティとバイオ医療への応用に関する研究が実施されている。

応用研究の最近の事例としては、THz-TDSを利用して、服飾品等の生地 of 素材を検査する研究を発表している。これにより、高額ブランド品が偽造物ではないか検査することが可能になる<sup>37</sup>。

---

<sup>33</sup> <http://www.npl.co.uk/>

<sup>34</sup> <http://www.serco.com/about/publicservicemarkets/npl.asp>  
<http://www.bis.gov.uk/nmo/national-measurement-system/future-operation-of-npl>

<sup>35</sup> <http://www.npl.co.uk/electromagnetics/>

<sup>36</sup> <http://www.npl.co.uk/electromagnetics/terahertz/>

<sup>37</sup> <http://www.npl.co.uk/news/terahertz-technology-fights-fashion-fraud>

## 英国の大学機関：インペリアル・カレッジロンドン大学：テラヘルツ科学・工学セン

### ター

2012年2月、インペリアル・カレッジロンドン大学の工学部に、テラヘルツ科学・工学センター<sup>38</sup>が創設され、英国におけるテラヘルツ研究のプラットフォームになることが目標とされている。インペリアル・カレッジロンドン大学では、従来テラヘルツに関する研究が物質学科、電気電子工学科、物理学科、セキュリティ科学・技術研究院（特にテラヘルツ放射のセキュリティ部門への応用）で実施されており、同センターはこれらの活動を統合して実施することになった。同センターはテラヘルツ研究の包括的な活動を行っており、特に、テラヘルツアプリケーション向けの新素材と電磁波測定の研究、最先端機能素材とマイクロ/ナノ製造処理技術に基づくパッシブな部品とアクティブな端末の研究開発、生物光学、セキュリティ、国防部門向けに電気通信と電磁波センシングの新アプリケーションの開拓、EMC・ミリ波とテラヘルツ光学・端末/回路シミュレーションと計量学の学際的な教育と研修を実施している。以上の他、インペリアル・カレッジロンドン大学内の学部や学科間の活動を刺激すること、同大学外の大学機関、研究所、政府組織、産業界との提携を促進すること、研究者間のアイデアや知識、資源の交換の場となること、教育活動の場となることが同センター設立の目的とされている。

テラヘルツ科学・工学センターは、0.06THz～4THz間のテラヘルツイメージングと分光を可能にする時間領域計測システムであるテラビュー社のTPS Spectra 3000 システム<sup>39</sup>とともに、アジレント社N5250A Performance Network Analyser<sup>40</sup>を設備として持つ。

<sup>38</sup> <http://www3.imperial.ac.uk/terahertz>

<sup>39</sup> <http://www.teraview.com/products/terahertz-pulsed-spectra-3000/index.html>

<sup>40</sup>

<http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?nid=-536902667.536883324.00&lc=eng&cc=GBroup/people/academicstaff/drstepanlucyszyn>

テラビュー社は、2001年4月にTOSHIBAリサーチ・ヨーロッパのスピノフ企業として設立され、テラヘルツの発生源と検出器の製品化やテラヘルツ光の応用開発を行っている。特に、セキュリティ、医薬品、自動車、ソーラーパネル、医療、絵画や手書き本等の非破壊検査向けに応用開発を実施している<sup>41</sup>。現在、同社は、ケンブリッジ大学のキャベンデュッシュ研究所<sup>42</sup>と緊密に研究提携している。

なお、テラヘルツ科学・工学センターは、RAL (Rutherford Appleton Laboratory) <sup>43</sup>に設置されたRALスペースのミリ波技術グループ<sup>44</sup>と提携している。同グループでは、ミリ波及びテラヘルツ (50GHz～2THz) の周波数帯を利用する最先端技術の研究を実施しており、特に、電波天文学や大気の大気遠隔センシングの研究を実施している。

## 第二節 ドイツ

ドイツでも、多くの公的研究機関、大学機関でテラヘルツ技術に関わる研究が実施されている。以下に、物理工学研究所 (PTB)、フェルディナンド高周波研究所 (FBH)、マックスプランク・ポリマーリサーチ研究所、フラウンホーファー・応用固体物理研究所 (IAF)、カールスルーエ工科大学 (KIT) の研究体制及び研究活動内容について記す。

### 物理工学研究所 (PTB)

物理工学研究所 (PTB) <sup>45</sup>は、計量学及び計量技術の開発を目的とする国立の研究機関である。同研究所はドイツ連邦経済・技術省の傘下であり、ドイツのブラウンシュバ

---

<sup>41</sup> <http://www.teraview.com/applications/index.html>

<sup>42</sup> <http://www.phy.cam.ac.uk>

<sup>43</sup> <http://www.stfc.ac.uk/RALSpace/Default.aspx>

<sup>44</sup> <http://www.stfc.ac.uk/RALSpace/18456.aspx>

<sup>45</sup> [http://www.ptb.de/index\\_en.html](http://www.ptb.de/index_en.html)

イク及びベルリンに施設を持つ。全人員規模は約 1800 名であり、9 つの部門を持ち（その内、2 部門がベルリンに設置）、その下に多くの研究グループが設置されている<sup>46</sup>。年間予算は、1 億 4000 万ユーロである。なお、前身機関である物理工学院（PTR）は、1887 年に設立された。

テラヘルツ技術に関しては、ブラウンシュバイクに設置された第二部門「電気」<sup>47</sup>の「HF（High-Frequency）と電磁場科」と「半導体物理と磁気科」、ベルリンに設置された第七部門の「熱とシンクロトロン放射科」で研究が実施されている<sup>48</sup>。

- ・ 第 2 部門：電気
  - HF と電磁場科（2.2）
    - ◇ 電磁場とアンテナ計測技術作業グループ：テラヘルツ帯の計測技術の研究<sup>49</sup>  
(2.21)
    - ◇ HF計測技術作業グループ：テラヘルツ帯を含む高周波の国家標準及び計測システムの研究開発<sup>50</sup>（2.22）
    - ◇ スキャタリングパラメータ計測の基礎（2.23）
  - 半導体物理と磁気科（2.5）
    - ◇ テラヘルツ光学作業グループ<sup>51</sup>（2.54）：高速電子デバイス向けに光電子工学計測技術を研究<sup>52</sup>
- ・ 第 7 部門：熱とシンクロトロン放射

---

<sup>46</sup> <http://www.ptb.de/en/fachabteilungen/struktur.html>

<sup>47</sup> <http://www.ptb.de/cms/en/fachabteilungen/abt2.html>

<sup>48</sup> <http://www.ptb.de/cms/en/fachabteilungen/abt2/fb-22.html>

<sup>49</sup> <http://www.ptb.de/cms/en/fachabteilungen/abt2/fb-22/ag-221/messmglichkeiten-221.html>

<sup>50</sup> <http://www.ptb.de/cms/en/fachabteilungen/abt2/fb-22/ag-222.html>

<sup>51</sup> <http://www.ptb.de/cms/en/fachabteilungen/abt2/fb-25/ag-254.html>

<sup>52</sup>

<http://www.ptb.de/cms/en/fachabteilungen/abt2/fb-25/ag-254/time-resolved-optoelectronic-measurement-techniques.html>

➤ 放射分析検知・放射温度測定課 (7.3)

- ☆ テラヘルツ放射測定作業グループ<sup>53</sup> (7.34) : テラヘルツ波向けに放射測定技術を開発

また、PTBの作業グループは、欧州国立計量研究院協会 (EURAMET)<sup>54</sup>の研究プログラムである欧州計量学研究プログラム (EMRP)<sup>55</sup>に参加し、「国内治安のためのマイクロ波とテラヘルツ計量」という研究プロジェクトを実施している<sup>56</sup>。同プロジェクトでは、空港で荷物等を、テラヘルツ技術を利用して検査する技術やシステムの研究開発を実施している。PTBの他、チェコ共和国のチェコ計量研究院、イタリアの国立計量研究所、フランスの国立計測実験研究所、スイスの高山気候・医療研究院、スロバキアの計量研究院等が中心となり、コンソーシアムを形成して、研究を実施している。

PTBの電磁場とアンテナ計測技術作業グループ (2.21) は、テラヘルツ通信研究所<sup>57</sup>という組織を、ブラウンシュバイク工科大学の研究組織と提携して運営し、テラヘルツ帯を利用する次世代高速無線通信技術の研究を実施している。特に、伝搬チャンネル、テラヘルツ反射器、アンテナ技術 (300GHz帯)、60GHzデモンストレーター、300GHzデモンストレーター、半導体技術を研究している。なお、ブラウンシュバイク工科大学のモバイル電波システム科<sup>58</sup>のトマス・クルナー教授は、「IEEE 802.15 THz interest」グループの責任者であり、同グループは将来的にテラヘルツを利用する通信システムの標準化を行うことが見込まれている。

<sup>53</sup> <http://www.ptb.de/cms/en/fachabteilungen/abt7/fb-73/ag-734.html>

<sup>54</sup> [http://www.euramet.org/index.php?id=emrp\\_call\\_2011](http://www.euramet.org/index.php?id=emrp_call_2011)

<sup>55</sup> <http://www.emrponline.eu/>

<sup>56</sup> [http://www.ptb.de/emrp/thz\\_security-home.html](http://www.ptb.de/emrp/thz_security-home.html)

<sup>57</sup> <http://www.tcl.tu-bs.de/index.htm>

<sup>58</sup> <http://www.ifn.ing.tu-bs.de/en/ifn/ms/>

<http://www.ifn.ing.tu-bs.de/en/ifn/ms/kuerner/>

PTB におけるテラヘルツ研究の体制や活動の動向を調査するために、同組織のベルリン及びブラウンシュバイクの研究者とのヒアリングに参加した。以下に、ヒアリング議事録を収録する。

### ヒアリング議事録 / ドイツ物理工学研究所 (PTB) ベルリン

**日時 :**

2013 年 9 月 9 日 (月) 午前 9 時～午後 4 時 30 分

**場所 :**

PTB ベルリン (ドイツ・ベルリン)

**参加者 :**

先方 : PTB ベルリン :

PTB テラヘルツ放射計測作業グループ (WG7.34) 責任者 : アンドレアス・ステイガー氏

PTB 温度・シンクロトン放射科 (7.3) 責任者 : ジョルグ・ホランド氏他 (ドイツ側最大 24 名)

当方 : 情報通信研究機構

松本室長、福永主任研究員、

藤井研究マネージャー、登坂専攻研究員、

菱沼欧州連携センター長、水野主任研究員

産業技術総合研究所

島岡主任研究員



#### 4. ヒアリング概要：

##### a) 【福永主任研究員講演】

(アンドレアス) 福永氏の紹介：1993年に東京電機大学で電気工学博士、武蔵野美術大学学士、1994年にNICTに入所。IEEE会員。文化財に対するテラヘルツのイメージングで世界的に有名。

(福永) 問題はこの(テラヘルツの)分野で標準がないことである。自分は計測の専門家に囲まれているので、計測データを好き勝手に解釈して間違わずに済んでいる。トップデータを出して論文やニュースにするだけなら、絶対値や標準がなくても良いかも知れないが、産業界にテラヘルツ波を使ってもらうにはボトムデータをおさえておくことが必須である。テラヘルツはエレクトロニクスと光との間である。NICTでは、基礎、デバイス、EMC、ICTへのアプリ等を研究開発している。産総研とは電力の国家標準で協力している。

ミリ波やテラヘルツはセキュリティ等に使われている。120GHzは通信への応用が実用化段階だが、精密電力測定は国家標準にトレーサブルではない。現在は国際的にも較正は110GHzまで、レーザのための較正サービスは10.5ミクロンなので、10THzまで届かない。市場にはいくつかパワーメータがあるが、国家標準にトレーサブルではないし、また分光器やイメージャーはたくさんあるが、較正もされていなければ測定プロトコルも確立していないので、利用者がどう選んでよいか分からない。NICTのテラヘルツプロジェクトは、通信応用を主なターゲットとしており、日本ではNTT、NHKが2014年ワールドカップで120GHz通信を用いる予定である。そのためには、通信に利用するライセンスが必要で、較正のサービスを開始する必要がある(3月又は4月)。300GHzも2020年の東京オリンピック等を視野に入れている。日本の一次標準では2つの機関

が協力しており、周波数は NICT、電力は産総研である。

(アンドレアス) 時間標準は PTB ベルリンでなく、PTB ブラウンシュバイクが実施している。

(福永) テラヘルツ計測技術 (Metrology) のプロジェクトを EMC グループ内につくった。最も大きな課題は、電力の精密測定で、特に通信利用のための 300GHz までの較正サービスのための研究開発に重点を置いている。また、ブラックボックスのようにモジュール化された発振器、受信機をどう較正するかも課題である。もちろん NICT は周波数標準を確立する研究をしているが、EMC グループとは別の所が担当している。

我々のプロジェクトのもう 1 つの柱が、テラヘルツ分光器の使い方、システムバリデーションである。低い周波数では分光というより誘電体の評価方法となり、マイクロ波までは NPL (英国立物理学研究所) が良い実践指針 (Good Practice Guide) を出している。NICT では誘電体の評価を DC から X 線までフルスペクトルで評価するという仕事をしてきた。たとえばミリ波帯では、通常よく用いられるポリイミドなどは水分を吸収して損失が 100 倍になったりするので、高周波帯域での誘電特性は重要である。TDS システム等テラヘルツ波帯での分光技術をどう汎用化していくかには、測定プロトコルの確立が重要である。1THz は 300 ミクロンなので、そのぐらいの粒径があると散乱してしまうので、透過率の低下が、物質そのものの吸収とはいえないなどの問題が出てくる。赤外線領域の分光では確立しているプロトコルが通じないことも多い。NICT では THz 分光器の使い方についてのガイドを準備しており、水野主任研が担当している。

(水野) 2014 年には英文を公表予定である。

(福永) 測定プロトコルの確立のベースになるラウンドロビンテストは、日本国内では NICT、産総研、理化学研究所で 3 種類のサンプル (Si プレート、アズライトペレット、

産総研製減衰器：メタライズポリマー) について実施し、NICT を中心に誤差解析を実施した。今後、分光器メーカーに参加を呼びかけ、国内で拡大ラウンドロビンテストを行う予定である。そこへ NPL から国際的にやらないかという問い合わせが来ている。日本では NICT が窓口になる予定である。

(クリスチャン) ドイツでも独自に企業も含めてラウンドロビンテストを実施した。データはそろったが解析はまだで、3 か月くらい先にはまとめられると思う。メタライズしたポリマーのサンプル(産総研のものに類似、サイズは直径 30mm 程度)で、それを NICT でも測定できるか。

(福永、水野) もちろん協力したい。後で詳細をディスカッションしよう。

周波数割当について、低い周波数は、非常に細かく割られて (pieces)、個別サービスに割り当てられており、自由勝手に使えないし、周波数ビジネスが存在する。しかし、防衛目的の周波数は分からない。1THz 以下についても日独で協力していきたい。

(アンドレアス) このサンプルはドイツでのラウンドロビンテストでも利用可能か。

(福永) このシリコンのものは広く調達可能である。シリコン板で、0.1~3THz で縦軸(透過率)の絶対値を比較するのに安定していて良い。アズライトペレットは、酸化銅の化合物の顔料で、透過で鋭い吸収ピークが出るので利用している。ただし、NICT で作製し、そのものを回している。

(アンドレアス) TDS (テラヘルツ時間領域分光法) もか。

(福永) 現在は TDS を行っているが、FT-THz、FTIR (中赤外の分光器：フーリエ変換赤外分光法) も。

(アンドレアス) 直径は。

(福永) 1 cm だったはずである。ミリ波のベクトルネットワークアナライザを用いた自

由空間法には小さすぎる。

(水野) その通り 10 mm。シリコン板はベクトルネットワークアナライザでは計測していない。

(福永) ベクトルネットワークアナライザでの計測は、通常のポリマーシートを利用している。ポリエチレン、ポリプロピレンは、ほとんど透明なので、ラウンドロビンには向かないかもしれない。

(島岡) 産総研の飯田氏が行っている。プラスチックをメタライズしたポテトチップスの袋のようなもの。それほど大きくなく、10 cmくらい。現在は2~3 cmくらいか。技術的に可能だが、予算の問題もある。

(福永) NPL がラウンドロビンテストをもちかけているので、それには協力する予定。

(アンドレアス) EURAMET のプロジェクトではフランスが TDS 評価用の標準物質を提供しているが、100%透過と 0%の 2 種類であり役にたたなかった。

(福永) NPL も標準物質を検討していると聞いている。

(アンドレアス) NPL は EURAMET のプロジェクトに参加していない。

(ドイツ側聴衆からの質問) FTIR と TDS との計測精度はラウンドロビンで比較してどうか。

(福永) 周波数帯が完全にはかぶらないので、簡単に比較できない。FT-THz は NICT でしか実施しておらず、他の機関は TDS のデータをもっている。NICT 内では水野主任研が実施した。

(水野) シリコン板。1~3THz で TDS と FTIR を比較した。

(福永) 周波数帯は完全に重なっていないので精密な比較はできないが、現状の応用に対しての実用面では充分つながっている。

(PTB) なお、THz 帯の較正実施については需要予測に基づいているが、現段階で PTB としては、何が主要な用途となるかはっきり予測できていない。(通信、セキュリティ、非破壊検査等の様々な議論がある)

b) 【フラウンホーファー研究機構ハイน์リッヒ・ヘルツ研究所 (HHI)】

先方：トルステン・ゴベル テラヘルツグループ長

c) 【PTB ベルリンでの議論・ヒアリング】

参加者：ドイツ側 4 名：ジョルグ・ホランド、クリスチャン・モンテ、  
アンドレアス・ステイガー、ベルンド・グチュワガー

日本側 7 名：

ヒアリング概要：

(ジョルグ) レーザシステム、光材料等の研究をしており、協力に積極的であり、テラヘルツの研究を続けていく。午前中の人々は天候、可視等の研究を実施している。

(福永) 日本側参加者の紹介。

(ジョルグ) 我々の機関はドイツの標準化機関である。英国・日本等と協力しつつ、共通の標準を作成したい。誰を議長にするかといった問題もある。

(福永) 日本では国家レベルではないが、産総研と NICT が主導している。

(ジョルグ) 毎年 2 回実施している。

(NICT) 何がテラヘルツの研究開発の推進力か。日本は通信が推進力だが。ライセンスの販売などか。

(アンドレアス) 支払いたくないということもある。

(ジョルグ) VDI <sup>59</sup>(Verein Deutscher Ingenieure :ドイツの工業団体)など、独の産業界はテラヘルツに期待している。PTBもオープンである。正当化が必要である。

(福永) 昔は、NICT 内でもテラヘルツが有用だと PR する必要があったと思う。自分は材料が専門で、化学者はなぜ FTIR (中赤外の分光器) しか使わないのか。ポリマーは何でもそれで済むから。セラミックは XRD (X 線回折) でわかる。テラヘルツだけができるのはおそらく無機有機コンポジット (複合材料)。ただ、X 線と中赤外を組み合わせるなどで解決してしまう可能性もある。いずれにせよ、まだテラヘルツ波帯の利用者は技術的にリテラシーを持つ必要があり、ハードルが高い。

(アンドレアス) 非破壊検査でも。セキュリティだけが応用ではないが、重要な出口。ブルカー (分光器の会社) だけではなく、シーメンスが空港での危険物検査装置をつかった。ソフトウェアにほとんどの予算を使ったらしい。

(福永) 非破壊検査でシーメンスと協力してはどうか? 彼らの高電圧機器に需要があるはず。テラヘルツの専門家だけでは、思いつかない用途がたくさんある。

(アンドレアス) これまでの非破壊検査は、超音波が多かったが、テラヘルツが必要となるものがある。

(福永) 既存の方法との比較が必要で、私自身は近赤外線や NMR との比較もしている。それを見せないと、非破壊検査業界は誰も興味を持たない。

(アンドレアス) 航空機、次世代車両などもある。テラヘルツの応用範囲は非常に広いが、炭素ファイバがダメだと、ダメと言われてしまうこともある。

(福永) 炭素ファイバは電磁波にとってはメタルの振る舞いなので、非常に困難。

(アンドレアス) 自動車産業はどうか。

---

<sup>59</sup> <http://www.vdi.de/>

(クリスチャン) どのくらい深くまで層構造をみることができるか？

(福永) 対象物質による。ポリプロピレン・ポリエチレンはcm、数百マイクロン程度のファイバーが使われていると表面しか見えない。耐熱コーティングの多くはセラミックで、透過率が高い。さらにほとんどが鉄の上に塗布されているので、そこからの反射波も解析に使える。セラミックのコーティングだと、赤外線は通らないので、テラヘルツに利点がある。

(アンドレアス) アプリケーションを探すのは我々ではない。

**【以下、NICT 欧州連携センターの質問票を受けた質疑応答】**

(ジョルグ) テラヘルツの専任が1人、もう1人は非常勤でファンディングから支援されている。他の2人はエフォート率10%で助けている。また、自分も助けている。1人はPTBからの給与、2人目はファンディングなのでPTBからは不要である。

テラヘルツレーザを公表しており、継続していく。較正ではテラヘルツの要請がない。数年で追跡が必要となる。5~10年でどうしていくか。応用研究になる。クリスチャンが支援している。

EUのFP7では、EURAMETで、小さい企業と組んでいる。ドイツ大企業には組む相手はいない。ミリ波もいる。光特徴化で行きたい。

(アンドレアス) 組んでいるのは独航空宇宙センター(DLR)であり、他にはない。

(菱沼) テラヘルツ波の定義は。

(アンドリアス) 光や赤外線の人などから異論もあるので、300GHz~3THzと狭くしたいが。

(ジョルグ) PTBとしては0.1~10THzをテラヘルツとして研究対象としている。

(クリスチャン) 遠赤外線、超伝導の応用研究も実施している。シリコンカーバイド。良いオブザーバーが内部にいる。

(アンドレアス) 欧州のプロジェクトと協力している。共に作業している。通信はやってない。2.22 はワイヤレスだが、我々も協力している。アンテナもトーマス。

(福永) パルス技術はどうか。

(アンドレアス) 高い。量子やフォトダイオードだと。検出器は、パルス波。最大限。1 ピコ・フェムト秒。ノンリニアでピーク出力は高い。

(アンドレアス) まだ終わっていないが、以前、グルノーブルとカスケード・カメラで協力。ボーマイヤ(レーザ会社)が唯一の協力相手。NECの小田氏に協力を求めたが、うまく行かなかった。

(福永) NICT が同社にファンディングしているので、コメントできるかもしれない。

(アンドレアス) それは、ドイツ・マインツでの会議(赤外線・ミリ波・テラヘルツ波国際会議: IRMMW-THz 2013)の9月6日(金)の結論でもある。フランスのレットイー(LETI)、カナダのエノー(INO)、日本のNECの3者で計測法を提案すれば、それに対してコメントくらいはするが、それを保証するような活動はまだまだ先の話である。

(福永) 彼らはPTBのお墨付きのようなものが欲しそうに感じられた。

(福永) PTB が協力している会社のスペリングは。

(ドイツ側) BOHMEYER。

(アンドレアス) 応用に関しては、薬局でコーティングされているので X 線は使えないがんの場所などに使える。韓国・豪州などで研究されている。

(福永) 絵画は良い対象だが、文化財関係には日本やドイツはお金がかからない。フランスやイタリア、ギリシャは出る。この前もナポリ大学からどの装置を買えば良いか問合せ



せがきた。壁画が対象なので、テラヘルツよりはミリ波を勧めた。ドイツの SynView 社が良い装置を作っていたが、会社ごと売られてしまった。

(アンドレアス) フランクフルト大学からのスピノフの会社で、大震災の後に壁を測定した結果を発表していた。

(福永) それは私のプロジェクトだったが、今は他の担当者が、外部企業に大きな予算をつけて実施している。

(アンドレアス) PTB は軍事に巻き込まれてない。

(アンドレアス) 欧州での推進力は大学、小さい企業、スピノフ企業。

(ジョルグ) セキュリティは重要ではない。プライバシーの問題がある。

(アンドレアス) イメージ・テスト目的。ファンディングは、独の研究省から。

(ジョルグ) 社会的受容の問題はある。

(アンドレアス) 携帯電話の受容も。

(福永) ミリ波。70~80GHz。車の衝突防止レーダーに使われている周波数は便利。パルスでの生物的影響をどう評価するかも課題かもしれない。

(アンドレアス) CW。シーメンスのは1つの送信機。アクティブ・センシング。

(福永) ポンペイで絵画に使いたいくらい。

(アンドレアス) 3D イメージ。

(福永) 博物館島での絵画検査と一緒に協力に行きたい。セキュリティ検査では個人のわかるイメージを消すが、それをみたいのが文化財。ベルリン国立美術館 (Staatlichen Museen zu Berlin: SMB) で、シーメンスが協力してくれれば。

(アンドレアス) 20GHz から 80GHz に変更か。深さは 1mm、2mm。

(アンドレアス) ドイツの財政当局、人々の目がある。いくら良いものでも、(見学)

客がいなければ（問題にある）。リニアモーターが良い例。

（2人目）携帯電話アンテナ、50%が懐疑的だったが、後日にオンにした。

（ジョルグ）ドイツのTV番組は何でも心配する。

（島岡）産総研は放射能検査器を用いて計測したところ。つくば市では検出器を付けたところ、そんなでない。

（アンドレアス）ニュースは詳細を言う。

（島岡）ブラウンシュバイクで、ユダシュクに会う予定。

（クリスチャン：福永）昼食で話したのだが、今後のラウンドロビンテストへの協力を考えている。

（福永）国内ではこれまでに、NICT、産総研、理化学研究所の三者。産業界はないが、今後は参加してくれる予定。

（アンドレアス）三者の結果が違ったらどうするか。TDS。

（福永）違うのを解析するのが仕事で、TDSに関してはほぼ終了。

（アンドレアス）英文の報告書はあるか。

（福永）ない。赤外とミリ波（IRMMW-THz2012）はどうか。

（水野）サンプル依存の評価だけしか書いていない。

（以下、詳細について検討。）

（以上）

## その他

いくつかの共通サンプルを用いた、THz測定装置の国際巡回試験の提案が受け入れられ、NICT、PTB双方の準備できる試料の具体的な仕様等について、今後詳細に調整を

することで合意した。

## ヒアリング議事録 / ドイツ物理工学研究所 (PTB) ブラウンシュバイク

### **日時 :**

2013 年 9 月 11 日 (水) 午前 10 時～午後 3 時

### **場所 :**

PTB ブラウンシュバイク (ドイツ・ブラウンシュバイク)

### **参加者 :**

先方 : PTB ブラウンシュバイク

- ・ 高周波計測技術作業グループ (WG2.22) 責任者 : ロルフ・ユダシュク氏
- ・ 高周波計測技術作業グループ (WG2.22) : ジョルゲン・リューアック氏
- ・ 高周波計測技術作業グループ (WG2.22)・スキヤッターリングパラメータ計測基礎作業グループ (WG2.23) : カーステン・クルマン氏

### 当方 :

- ・ 産業技術総合研究所 (産総研) : 島岡主任研究員
- ・ 情報通信研究機構 (NICT) : 藤井研究マネージャー・登坂専攻研究員・菱沼欧州提携センター長

### **ヒアリング概要 :**

(島岡) 本日は訪問を受け入れてくれてありがとうございます。ここにいる NICT は周波数標準を担当している。所管省庁は異なるが、産総研と NICT は標準で協力している。ドイツではどうか。

(ロルフ) ドイツでは政府当局自身が担当している。

(藤井) NICT ではアンテナ較正等を実施している。

(登坂) 私は NICT で EMC (Electromagnetic Compatibility) を担当している。テラヘルツ等の高周波に取り組もうとしている。

(ロルフ) 当方には 3 つの作業グループがある。なお、PTB ベルリンは物理的部分、PTB ブラウンシュバイクがエンジニアリング的な部分を担当している。自分の所は校正がメインである。コンポーネンツに良いアクセスを有している。

(島岡) 産業界から校正の要請はあるか。

(ロルフ) 例えば、EADS からの要請がある。軍のジェットや航空機でない部分、レーダシステム等もある。

(島岡) 年にどのくらいの件数があるのか。

(ロルフ) 年間 350 件くらい。全ての校正の要望を PTB の中にある現 DAkkS (デックス:旧 DKD) が担当している。20 の認定校正機関と他のユーロメット内 NMI に校正サービスを提供している。110GHz の校正を提供している (供給先はローデシュワルツ社のみ)。

(島岡) 110 GHz、W バンドか。

(ロルフ) 110 GHz。パワーセンサ (1 mm 同軸コネクタ、アジレント社)。410 GHz 帯でセキュリティや健康分野から機器校正の要請がある。240 GHz のトレーサビリティを誰も実現できていない。産業界からの要請はないが、議論したことがある。

(島岡) 350 件のうち、S パラメータの割合はいかほどであるか。

(ロルフ) 40%はパワー、30%は S パラメータ、残りは減衰量と高周波電圧 (フルーク社、1 GHz 及び 2 GHz)。アンテナは別のグループが担当している。プロビレッジもある。

(島岡) S パラメータの上限はどのくらいであるか。

(ロルフ) 50 GHz である。320 GHz の校正も (技術的に) 可能であるが、需要がないので、行っていない。110 GHz の校正を今後 12 か月で開始予定である。既に (準備は) 終了しているが、書類作業が残っている。

(島岡) 日本ではアンリツ等が実施している。

(ロルフ) 以前はオールデンスタツツ、NPL (英国立物理研究所) 等が実施していたが、NPL はもはや校正を実施していない。

(島岡) ビジネス的な問題か。料金を上げた例も聞いたことがある。

(ロルフ) 校正だけでなく研究開発もある。

(島岡) 標準の研究のことか、他にも研究しているのか。

(ロルフ) PTB は、以前は標準と校正であったが、最近 5~10 年は、プロジェクトにより、MRP プログラムを実施している (この 5 年くらい)。5 年前は 90% が常勤職員だったが、現在は 30% が非常勤職員、70% が常勤職員になっている。

(島岡) 非常勤職員は、プロジェクトがらみということか。

(ロルフ) 研究プログラムからであり、ドイツでは技術省からの支援が強い分野である。フラウンホーファー研究機構等は (助成を) 多く獲得している。ドイツ研究基金は全科学分野、特に大学に対して助成する。我々は大学の分野ではないが、長い歴史があり、以前は公表しなかったが、現在は何でも公表する。PTB は結果の公表に保守的だったが、変わってきている。

(島岡) 人員数等は。

(ロルフ) プレゼンテーションで説明する。

(ロルフ) このプレゼンテーション原稿は 2012 年 2 月 8 日のものである。高周波と電

磁波の領域が対象であり、SI トレサブルなテラヘルツへの拡張を目指している。私は第2部 (division) に所属しており、この部は6つの部門 (department) に分かれている。自分は2.2 (高周波と電磁場) に属しており、この中に3つのWGがある (電磁波WG : 常勤5名+非常勤4名、高周波計測技術WG : 常勤6名+非常勤3名、Sパラメータ計測WG : 常勤2名+非常勤1名)。自分はトレサビリティの可能性を研究している。以前はDAkksをドイツ校正サービス(DKD)と言った。テラヘルツへの校正の拡張を2014年に検討している。20のDAkks (により認定された校正機関) がある。

(島岡) 誰が技術面を評価するか。

(ロルフ) 以前はISO/IEC 17025認定に関する部分をDKDが行い、PTBが技術面について緊密に協力していた。審査はPTBが実施していた。DAkksの審査員は、90%がPTB内部 (及び退役者) からであり、他は産業界OBなど外部からのものである。以前は緊密な関係であったが、現在はPTBとDAkksの間で費用を課している関係である。

自分のグループは、高周波のパワー、インピーダンス、減衰量、電圧に関するトレサビリティを担当している。アンテナ計測は30 MHz~325 GHzである。最近是非調和信号及びデジタル変調に関するトレサビリティも取り扱っている。

現在のプロジェクトは、MHzからTHz間に及んでいる。トレサビリティ、校正サービス会社にはILS社がある。100 GHzまでのアンテナ・アレイ。

テラヘルツ通信研究所に関しては、ブラウンシュバイク工科大学と協力している。

EMC作業グループではレーダ上の風力発電所の影響を研究している。これは、レーダ等の電波施設から20 km離れていなければならない。福島での原発事故の後にドイツでは原子力発電所を止める決定をしたため、風力発電は重要である。しかし、0.28ユーロ/kWhと発電コストが高く、家庭で毎月100ユーロは高い。JRP EMF (電磁場) と SAR

は、300 GHz までを目標にしている。

THz 放射の有害な影響を、106 GHz、380 GHz、2520 GHz でテストした。3つの単独テストではいかなる有害な影響も見られなかったが、106 GHz で人間とハムスターの組み合わせた細胞に、細胞分裂期に核内に生じる糸状の紡錘体に欠陥が見られた。

(藤井) NICT ではこれから 120 GHz と 300 GHz で始める予定である。

(ロルフ) 低い周波数帯であると思う。

(藤井) アンプを調達するのが大変である。

(島岡) ジャイロトン発信器を研究している人々と協力してはどうか。

(ロルフ) 誘電体導波管とエリクソンの出力メータによる実施スキャニング。ファイバを使っている。サンプルが必要である。

EMRP (欧州計量研究プログラム) の共同プロジェクトでは、テラヘルツ波のセキュリティ部門に利用するプロジェクトを実施している。

英国の小企業のトーマス・キーティング・パワーメータを使っているか。

(藤井) NICT で使用している者がおり、トーマス・キーティング・パワーメータを知っているが、私は使用したことがない。

(ロルフ) セキュリティ・スキャニングの計測。テラビュー社。ネットワーク・アナライザーと 200 の ID ポート。

(島岡) S パラメータの標準の計画は。

(ロルフ) 325 GHz である。フランジ接続による測定再現性が低いのが問題。IEEE の標準規格化グループがあり、新しい標準規格を作ろうとしている。

(島岡) 堀部博士が同標準規格化グループに参加している。

(ロルフ) 簡単ではなく、問題がある。

(島岡) 来春には D バンド 170 GHz 帯の高周波電力校正サービスを開始する。

(ロルフ) 300 GHz 信号の多重反射効果と 60 GHz~300 GHz の人体への影響を、自分は担当していないが、大学とともに実施している。

当グループでは、高周波の電圧、パワー、S パラメータ、減衰量、インピーダンスを担当している。

NPL はサーミスタ・センサーを利用。こちらはダイオードセンサー。

現在の 110 GHz まではそれほど高くない。

これまでに、ミリ波出力センサー、110 GHz までのミリ波減衰測定器等を開発している。

(島岡) 我々は熱型高周波電力計の校正の誤差(不確かさ)を評価しようとしている。リトアニアのエルミカ(Elmika)社がドライカロリメータを作っている。旧ソ連はウクライナのハリコフとリトアニアが持っていたが、ソ連崩壊後に分裂し、ウクライナは国家計量研究所、リトアニアは私企業所有となった。110 GHz から 170GHz の CMC が登録されている。ロシアの ELVA-1 社は、ウクライナに校正のためパワーメータを送っているのではないかと。しかし、それを知る手段がない。

(ロルフ) W (M) CMC。

(島岡) エルバ社が来て、ウクライナの標準器は(本来そうあつてはならないが)調整出来てしまうと言っていた。

(ロルフ) ロシアの導波管規格はちょっと違う。最近 33~50 GHz の国際比較を行っているが、S パラメータ等は(結果が)違う。

(ロルフ) 部品だけか、それともパワーメータ本体全部買ったのか。

(島岡) パワーメータ本体全部、ロシアのエルミカ社からである。D バンドで、170 GHz



で校正の不確かさ 5%である。約 200 万円した。

(ロルフ) ELVA-1 は知っているが、それは知らない。

(ロルフ) エリクソンのパワーメータはどうか？

(島岡) 良くないと思う。エリクソン社のパワーメータに導波管は 110 GHz 対応のものを使用している。

(ロルフ) WR10 バンドは良いが。

(島岡) 信号を良く吸収する場合は良いが、信号反射があるとどうか。

(ロルフ) 170 GHz の校正の顧客はいるのか。

(島岡) いくつか引き合いが来ている。

(ロルフ) 33~50 GHz で R400 から 75~110 GHz まで実現した。また、10MHz~50GHz で 2.4mm まで高周波電力標準を整備した。

2014 年までにウェハー上と高周波物質で計測技術を実現したい。95%のウェハー上での計測を実現したい。

(島岡) 校正と研究開発の比重はどうか。

(ロルフ) 自分は研究開発の比重が低くなってきている。自分は校正自体には携わっていないのだが、校正のための書類やソフトウェア評価などがあるので、研究開発は 20% くらい。自分のグループは 70~80%が校正で、20~30%が研究開発である。結局、色々と最新の情報を読んだりする時間がない。非常勤職員は、良い成果を挙げるが、方法論としてあまり続かない。3年間だけ PTB で働きに来る研究者が方式を洗練させている。

(島岡) 65 歳まで NICT に在籍した現在 69 歳くらいの井上博士は、今でも産総研に週 2 回来るが、無給になってしまっている。

(ロルフ) 当方でも類似の事例があり、ステュンパー博士は週 2 回来ており、ヤニック

博士が以前は週 1 回来ていた。

(島岡) 規則でこれらの方に給料を支払うことができないという問題がある。

(ロルフ) 常勤職員の多くは公務員であり、退職後に国家から年金が出るので(無給となる)。

(島岡) 日本では退職年齢と年金支給開始年齢の差が広がってきている。1 万ユーロ。ヤニック博士もそう。DAkkS は支払可能だが、PTB は不可である。

#### 【産総研説明】

(島岡) 産業技術総合研究所(AIST)の計測標準研究部門(NMIJ)があるつくば市は、面積 285 km<sup>2</sup>、人口 20 万人のうち、研究者 12,200 人、博士 5,700 人(約 3%)、研究所が 134 か所ある。

(ロルフ) 光エレクトロニクス部門は、PTB に属しているが、当研究所ではない。

(島岡) 電磁波計測科高周波標準研究室では、高周波電力出力・電圧、インピーダンス、減衰量、雑音関係の標準開発及び校正を実施している。

高周波電力の校正を実施している。NMIJ の校正サービスは、毎年 25~30 件を実施している。JCSS は計量法に基づく国内システムである。10~18 GHz において 7 mm の同軸導波管向けの広帯域周波数出力標準である。0.4~0.5%。トレーサブルな 110 GHz までの校正である。ITU-R では 300 GHz までを想定しており、2016 年リオデジャネイロ・オリンピックまでに開発予定である。

(ロルフ) 野心的だ。

(島岡) カロリメータは、双子型ドライカロリメータ。校正は、JCSS で 0.01 GHz~40 GHz、40 GHz~110 GHz も海外 NMI によるトレーサビリティがある。

(ロルフ) カロリメータがオフとオンで、予め h2 を温め、冷却するが、電圧は 0 か。

(島岡) 検出と冷却がある。冷却は 2 mW。熱起電力が 0 まで下がる。

(ロルフ) 断熱線路の材質は？

(島岡) 50  $\mu$  m 厚で、ニッケルと金から作られている。その性能については、温度シミュレータでも計測した。

(島岡) 110 GHz~170 GHz 高周波電力標準開発のモチベーションとしては、2014 年ブラジルでのワールドカップで放送用 FPU (屋外に光ファイバ敷設は無理なため) に使うことを目標としている。120 GHz の超高精細映像伝送に必要であり、放送局免許等が必要となる。

(ロルフ) V バンド及び W バンド国際比較について協力していきたいが、比較用仲介器が問題であり、我々は W バンドサーミスタ 1 個しか持っていない。

(島岡) NMIJ において過去の国際比較で使用したサーミスタは数個あるかも知れない。

(島岡) 現在 50 GHz~170 GHz (V、W、D 帯) のすべての周波数帯でカロリメータを開発中であり、まずは 110~170GHz 帯における校正サービスの開始に持っていきたい。

#### 【高周波電力・インピーダンス研究所等 6 か所見学】

(以上)

#### 5. NICT からの質問票への回答

高周波計測技術作業グループ (WG2.22) が設置されている高周波・電磁場部門のスタッフは何名か。
--

- ・ 研究者：9名
- ・ その他のスタッフ：13名

高周波・電磁場部門の予算はどのくらいか。

- ・ 年間 200 万ユーロ

EUのFP7プロジェクトには参加しているか。

- ・ 参加している。

欧州諸国と非欧州諸国に研究パートナーを持つか。

- ・ その通り。

あなた方が「高周波」という場合、どの周波数帯域を指すのか。

- ・ 10 MHz～110 GHz である。

あなたの組織では、現在どのようなドイツ国家標準を開発しているか。

- ・ 110 GHz を上限とするパワー、減衰量、インピーダンス

現在、ETSIはテラヘルツ波の定義、パワー標準、計測プロセス、利用に関して標準化作業を行っているか。

- ・ 否

PTB内の他の作業グループと応用研究のために協同して開発を行っているか。

- ・ その通り。

非破壊検査等の実際の利用で、ミリ波等と比べて、テラヘルツ波の長所と短所は何か。

- ・ 長所：帯域、解像度
- ・ 短所：
  - ・ 利用するのに必要なパワーが確保できないこと
  - ・ 自由な空間の伝搬ロスが大きいこと
  - ・ 信号に対するノイズの割合が大きいこと
  - ・ 技術的な問題

### フェルディナンド・ブラウン高周波研究所 (FBH)

フェルディナンド・ブラウン高周波研究所 (FBH) <sup>60</sup>は、1992年に設立された公立の研究機関であり、マイクロ波及び光電子 (オプトエレクトロニクス) に関する基礎研究と応用研究の間に位置づく研究を実施している。同研究所は、ライプニッツ協会の一機関であり、旧東独地域の研究機関に端を発している。組織構造は、ビジネス部門と研究部門に分かれ、前者はアプリケーション毎、後者はトピック毎に部が分割されている。FBHのスタッフは現在約 270 名であり、そのうち、約半数が科学者 (研究者) と博士号取得者で、もう半分がクリーンルーム技術者 (約 50 人) や事務局員である。テラヘルツ関係の研究者は、5~6 名である。FBHは、ドイツ連邦政府やベルリン州政府から資金を供給されており、全予算は 2012 年度 2170 万ユーロ、そのうち 1000 万ユーロが産業界等からの研究契約の収入である。EUからの助成金はあまり多くなく、連邦政府からの助成が多い。テラヘルツ関係の予算は 50 万~100 万ユーロで、約 5 人の人件費や

<sup>60</sup> <http://www.fbh-berlin.com>

クリーンルームの経費である。なお、FBHの設立されている地域は、フンボルト大学やDLR等、多くの研究機関があり、研究開発拠点集積地域である。

FBH の主な研究テーマは、マイクロ波や光電子のコンポーネントの研究である。商用化活動にも積極的であり、開発品を市場に出したり、スピンオフ企業を設立したり、産業界と協力している。最新の研究例としては、医療・バイオ分野での紫外線 LED の応用、ドイツで人気のある天候・エネルギーの分野では、エネルギー効率を高める携帯電話技術の研究が挙げられる。自動車業界とは、高精細レーダにより、衝突を防止したり、自動交通システムを開発している。テラヘルツ技術に関しては、イメージングシステム及び高周波数帯の無線コミュニケーションシステムを開発している。後者に関しては、300~500GHz 帯の高速通信（最高 100Gbps で送信）や、携帯電話基地局間のバックホールや建物間の固定無線アクセスへの使用を見込んでいる。

フェルディナンド・ブラウン高周波研究所（FBH）を訪問し、同組織におけるテラヘルツ技術の研究開発体制と FP7 の THzPowerElectronics プロジェクトの概要について伺った。以下に、そのヒアリング議事録を収録する。

### ヒアリング議事録 / フェルディナンド・ブラウン高周波研究所（FBH）

**日時：**

2013年9月10日（火）午後2時～午後3時30分

**場所：**

フェルディナンド・ブラウン高周波研究所（FBH）（ドイツ・ベルリン）

**参加者：**

先方：フェルディナンド・ブラウン高周波研究所プロセス技術部：ニルス・ウェイマン  
博士

当方：情報通信研究機構欧州連携センター 菱沼宏之 センター長

**ヒアリングの概要：**

先方組織の概要について

(菱沼) (今回の訪問目的、NICT のテラヘルツ関連の研究開発の概要を紹介。)

(ニルス) [プレゼン資料に沿って説明] 本研究所は 1992 年設立された公立の機関であり、ドイツ連邦政府やベルリン州政府から資金を供給されている。旧東独地域の研究機関に端を発しており、ライプニッツ協会の一機関である。

組織構造としては、トランクル所長の下、ビジネス部門と研究部門に分かれ、前者はアプリケーション毎、後者はトピック毎に部が分かれていて、自分はプロセス技術部に所属している。テラヘルツ関係には、研究者が 5~6 名おり、他に研究所共有のクリーンルームから支援を受けている。

(菱沼) 研究所の人数とそのうちの研究者数を教えて頂きたい。

(ニルス) 当研究所のスタッフは現在約 270 人であり、そのうち、約半数が科学者（研究者）と博士号取得者で、もう半分がクリーンルーム技術者（約 50 人）や事務局員である。なお、この近くのエリアは、フンボルト大学や DLR 等、多くの研究機関があり、研究者だけでも 8000 人から 1 万人ぐらいいるような研究開発拠点集積地域である。

(菱沼) 予算を教えて頂きたい。

(ニルス) 全予算は、2012 年で見ると 2170 万ユーロ、そのうち 1000 万ユーロが産業

界等からの研究契約の収入である。EUからの助成金はあまり多くなく、連邦政府からが多い。テラヘルツ関係の予算はおそらく50万~100万ユーロで、約5人の人件費やクリーンルームの経費等である。

(菱沼) どの省庁から資金が供給されているのか。

(ニルス) 連邦研究省 (BMBF) からであり、通信関係省庁からはない。商業省から少しある。産業界との契約は、通信事業者のドイツテレコム (T モバイル)、英ボーダフォン等である。

(菱沼) [昨日当方が訪問してきた] フラウンホーファー研究機構のハイブリッド・ヘルツ研究所 (HHI) と支援構造が似ているのか。

(ニルス) その通り。我々の研究機関と HHI は類似している。連邦政府、州政府、産業界が支援者という点で似ている。フラウンホーファー研究機構は元々旧西独が中心で、当研究所を含むライプニッツ協会は元々旧東独が中心ということはあるが、ドイツ統一後、相互に乗り入れているので違いが分からなくなっている。

#### 先方組織の研究パートナーについて

(菱沼) 欧州内や欧州外の研究機関と協力関係はあるか。

(ニルス) 自分は、米国ニュージャージー州のベル研究所にいた。この研究所は、今はアルカテル・ルーセントになってしまっているが。そこでは高周波、トランジスタ、回路といったことを扱っていたので、彼らと連絡を取ることはできる。しかしながら、これを含めて欧州外で正式な連携関係にはない。欧州内ではフランスやスイスの機関と連絡を取っているが、正式に協同連携の合意があるのは、ドイツのヘテロ・インディウム・シーモスウェハー (IHP) という、フランクフルト・オーダー (ドイツ西部のフランクフルト・アン・マインではなく、旧東ドイツ地域でポーランドとの国境付近) にあるシリ



コン電子工学の研究所だけである。この研究所では、CMOS とバイポーラトランジスタを使ったバイシーモス (BiCMOS) トランジスタの開発を実施している。すでに技術を確立し、現在端末の周波数帯域を拡張しており、テラヘルツ波にも拡大していつている。だが、出力に関しては、シリコンよりもインジウムを利用する半導体の方が強い。我々は IHP とシリコンとインジウムの半導体を合わせる研究開発を実施している。なお、フランクフルト・アン・マイムのゲーテ大学でもテラヘルツの応用研究が盛んであり、協力している

#### 先方組織の主な研究テーマについて

(菱沼) 実施している研究開発は、基礎研究と応用研究のいずれになるのか。

(ニルス) 基礎研究と応用研究の間のようなものであろう。デバイス、回路、素材に関わる基礎研究から、デバイスや回路の開発のような応用研究まで実施している。100GHz でパワー増幅器、テストステーションも開発している。

主な研究としては、電波や光電子 (オプトエレクトロニクス) のコンポーネントの研究をしているが、常に応用することを念頭においており、市場に出したり、スピンオフ企業を設立したり、産業界と協力している。最新の研究例としては、医療・バイオ分野での紫外線 LED の応用、ドイツで人気のある天候・エネルギーの分野では、エネルギー効率を高める携帯電話技術 (少ない電力の消費で済むインフラや窒化ガリウムを利用する端末の開発) を研究している。自動車業界とは、高精細レーダにより、衝突を防止したり、自動交通システムを開発している。

テラヘルツ技術に関しては、イメージングシステム及び高周波数帯の無線コミュニケーションシステムを開発している。後者に関しては、300~500GHz 帯で、大量のデータを最高 100Gbps で送信したり、携帯電話基地局間のバックホールや建物間の固定無線

アクセスに使用しようとしている。また、同研究所では、ほとんどの研究者が電気よりも光について研究しており、数年前より、鉄等を切断する高出力レーザや、ビルの壁等に RGB（赤緑青）レーザを投射する高いイメージ品質を実現する大規模映写技術を開発している。宇宙での利用に関しても少ないながら研究を進めており、光で衛星間通信、大気汚染観測の研究も実施している。応用研究例として、独 DLR（ドイツ宇宙航空センター）と高解像度レーダで協力している他、仏 EADS（エアバスの親会社）とも協力している。また、窒化ガリウムや窒化インジウムを使い、半導体レーザの研究も実施しているが、レーザだけでなく、モジュールを電子部品等に統合する研究も行っている。この施設内に設置されたクリーンルームで、ウェハーとチップを開発し、さらに、それらを一まとめにすることも行っており、モジュール化して、産業界や他の研究機関に出ているものがある。他には、ナノやエピタキシの研究も実施しており、クリスタル、窒化ガリウムや窒化インジウム、20~50nm（ナノメートル）のナノ構造リング等も研究している。また、マイクロ統合、マイクロチップスも開発している。光研究に関しては、イエノプティック（JENOPTIK）という当研究所からのスピンオフ企業とも協力している。

（菱沼）[テラヘルツ波による絵画の非破壊検査を説明]。

（ニルス）テラヘルツ波を発生させている技術は何か。

（菱沼）[的を得ていない回答かも知れないが、] 昨日 PTB と議論した際には、TDS（テラヘルツ時間領域分光法）や FT-IR（フーリエ変換赤外分光法）の話が出ていた。

（ニルス）なるほど。

（菱沼）研究のポイントを教えて頂きたい。

（ニルス）窒化ガリウム、100GHz 帯で、インジウム、窒化ヒ素（GaAs）を利用して

る。窒化ガリウムは増幅器に用いられ、センシングしやすい、冷却しやすいといったメリットがある。[EADS とは、新規の手段として、スピノフ企業]。ISO 9001、ISO 14001 等を取得しているので、チップを実用化しやすい。

#### FP7 THzPowerElectronics プロジェクトについて

(菱沼) THzPowerElectronics プロジェクトは、EU の FP7 の「提携協同 (Cooperation)」の ICT 部門から助成されているわけではなく、「人材 (People)」の CiG (Career Integration Grants) から助成されている。CiG とはどのような助成プログラムであるか。

(ニルス) 私のように (米国という) 外国から欧州内に戻ると応募できる助成プログラムであり、外国で経験を積んだ研究者に欧州に戻ることを奨励している。この助成金は給料だけでなく、研究費としても利用でき、欧州でのキャリアを形成することができる。外国で3年以上居たことが条件となる。要求する金額にもよるだろうが、応募件数のうち約40%が採択されて助成を受けることができる。金額は10万ユーロと大きくはない。

(菱沼) 一般の FP7 は、3 か国以上からの応募が前提であるがこの点についてはどうか。NICT は自ら研究を実施するだけでなく、助成も実施しており、EU とは研究開発案件への共同公募を実施しているが、欧州側の条件が3か国以上だったのでお聞きしている。

(ニルス) この EU の助成は人に対して助成するものであり、プロジェクトに対する助成ではないので、3 か国以上といったことはない。

(菱沼) この FP7 プロジェクトには何人の研究者が参加しているか。

(ニルス) 私の研究グループから現在5名が参加しているが、この施設で他の研究者と研究インフラを共有して利用しており、それを数えるならば、このプロジェクトに関係しているのは全部で10名程である。

(菱沼) 同プロジェクトの研究開発のポイントを教えてほしい。

(ニルス) 自分の研究しているテラヘルツ波や光発生よりも電子工学の研究に近く、半導体トランジスタプロセスを開発している。トランジスタをポリマーに組み込み、基板の上に置かない。基板を利用すると、高周波ではロスが多くなる。以上の理由で、半導体基板を取り除き、全ての要素を例えば窒化アルミニウム (AlN) のセラミックの上に置き換えている。このようにして、ロスを減少させることができる。我々は2つのフレームを持ち、トランジスタを窒化アルミニウムのキャリアと IHP と開発しているシリコン・ゲルマニウム・バイシーモス (SiGe BiCMOS) ウェハールの上に置いている。このクリーンルームでは、マイクロストリップラインを信号伝達のために開発している。

以上が同プロジェクトの原理的な部分であるが、現在我々は 400GHz のデバイスを開発しており、200GHz まで可能である。同プロジェクトでは、2年後ぐらいには  $0.2\mu\text{m}$  で 700GHz を目標としている。下方 (の土台部分) を広くして、その上で上下から挟んで接続部分を狭くする方法もあれば、当方では、上下から挟んで接続部分を狭くし、下方 (の土台部分) はコネクタとしてそれほど広くしていない。現在は  $0.8\mu\text{m}$  で 400GHz だが、これを  $0.4\mu\text{m}$  で 550GHz に持っていく、最終的には  $0.1\mu\text{m}$  で 500GHz に持っていく。同技術のアプリケーションとしては、通信ではなく、イルミネーション・イメージング等に使用できるようになると思う。ダイオード等で三重化することもあり、最終的にテラヘルツ帯域に到達する。これにより、出力は弱まり、ノイズが小さくなり、ワイヤレスの基地局やビル間などに使えるであろう。パワーアンプ (出力増幅器) は、450~500GHz であり、発信側の幅が  $0.1\mu\text{m}$  である。

クリーンルームには専従者が約 50 人におり、規模が大きい。午前 7 時 30 分から午後 9 時 30 分に 2 交代制で従事しており、いつでも研究者が利用できるようにしている。逆に言えば、施設が利用できないから研究できないという言い訳を許さないようになっ

ている。ニコンの i12、20+1m を利用し、独の Vistec 社が e ビームを開発している。

BiCMOS はシリコンとインジウム等を組み合わせている。85GHz VCO から、170GHz は離せない。だが、トランジスタを小さくすると、300GHz ができそうである。1~1.5THz は難しく、今後 10 年間くらいかかりそうである。同プロジェクトでは 4 年間のプロジェクトである。

発信側の幅を  $0.8 \mu\text{m} \rightarrow 0.4 \mu\text{m} \rightarrow 0.2 \mu\text{m} \rightarrow 0.1 \mu\text{m}$  と縮小していくことにより、高周波にしていくが、このためにはクリーンルームの問題がある。技術者が動けるか、研究者がどうするかが問題である。

#### ドイツ政府のテラヘルツ技術の研究開発支援動向について

(ニルス) 連邦政府はテラヘルツの大きな支援者である。その他、大学とサブコントラクトを締結している。BMBF (研究省) は宇宙研究開発事業にも関係している。なお、DLR、ESA (欧州宇宙庁) もテラヘルツに助成している。

#### テラヘルツの欧州における標準化動向について

(菱沼) テラヘルツの標準化についてご存じであれば教えて頂きたい。

(ニルス) 標準化については知らない。PTB が標準を実施していると思う。

#### テラヘルツ技術の研究開発における欧州の強みについて

(菱沼) 米国は軍など予算が豊富だが、欧州の強みは何と考えるか。

(ニルス) 米国は DARPA 等の国防関係から多くの研究費が来る。一方、欧州では研究開発を所管する省庁から助成されることが多く、市民向けのアプリケーションの開発に特色があり、国防には費やさない。

(菱沼) アメリカに滞在されていた時もテラヘルツ技術の研究開発を実施していたのか。

(ニルス) 私がアメリカにいた時は、300~380GHz 帯の通信技術の研究をしており、

広帯域アプリケーション、ファイバ、モジュレータアンプ、位置測定など、通信関係のアプリケーションの開発を行っていた。参考までに言えば、自分が米国のベル研究所にいた際は、DARPA からの資金もあった。

最後に、クリーンルームを見学。実際の稼働時としては、クリーンルーム専従者と研究者が半々くらいの人数。

(以上)

先方組織の施設の写真（撮影 菱沼）



マックスプランク・ポリマーリサーチ研究所

マックスプランク協会の研究所の一つ、マックスプランク・ポリマーリサーチ研究所<sup>61</sup>では、半導体、電気・電子の他、テラヘルツ、光等を通信技術向け、合成化学から

<sup>61</sup> <http://www.mpip-mainz.mpg.de/home/en>

電子工学に渡る（ソフト）凝縮物質の基礎研究を実施している。

テラヘルツ技術に関して、2つの研究グループが設置されている。第1のグループは、分光法を研究しており、テラヘルツ波の発生、フォトンから電子へ効率的に変換する研究、そして、フィルム、ナノ、半導体等のデバイスの研究を実施している。第2のグループは、電子ダイナミクスと合わせて、テラヘルツ技術の研究を実施しており、特に、テラヘルツをセンシングに利用する研究を実施している。電子等の他、データ通信に利用可能なマイクロ波等のアクティブな電波を検出することを目的としている。光回線とテラヘルツの無線技術を組み合わせる研究を実施している。

マックスプランク・ポリマーリサーチ研究所を訪問し、同組織におけるテラヘルツの研究開発体制と活動と FP7 の Lighter プロジェクトの概要について伺った。以下に、そのヒアリング議事録を収録する。

#### ヒアリング議事録 / マックスプランク・ポリマーリサーチ研究所

**日時：**

2013年9月12日（木）午前10時～午前11時50分

**場所：**

マックスプランク・ポリマーリサーチ研究所（ドイツ・マインツ）

**参加者：**

先方：マックスプランク・ポリマーリサーチ研究所 分子分光法研究所長：ミシャ・ボン氏

マックスプランク・ポリマーリサーチ研究所 超高速ダイナミクス・テラヘルツ

分光法グループリーダー：ドミトリー・トゥルチノヴィッチ氏  
当方：情報通信研究機構 欧州連携センター長：菱沼 宏之

### ヒアリング概要：

#### 【所長室にて議論・ヒアリング】

#### 先方組織の研究概要について

(菱沼) (NICT のテラヘルツの研究概要、訪問目的を説明。)

(所長) 本研究所は基礎研究が中心であるが、ICT 研究の将来的な応用を予測するように努力している。分野としては、半導体、電気・電子の他、テラヘルツ、光等を通信技術向けに研究し、また、合成化学から電子工学に渡る (ソフト) 凝縮物質研究を実施している。なお、ドミトリーは、以前はデンマーク工科大学 (ロシア・サンクトペテルスブルク出身) におり、自分はオランダからドイツのマックスプランク研究所に赴任した。

我々の組織には、テラヘルツ技術に関して、2つの研究グループがある。第1のグループでは、分光法を研究しており、テラヘルツ波の発生、フォトンから電子へ効率的に変換する研究、そして、フィルム、ナノ、半導体等のデバイスの研究を実施している。トヨタとテラヘルツについて、基礎研究分野で協力している。自動車の塗料をフォトン素材で置き換える研究を実施しており、トヨタは非常に早い段階でこの技術に関心を持っている。小さなソーラーパネルを自動車の屋根に付けて、それをエアコンの電源とする技術はすでにあるが、我々としてはより大型のソーラーパネルを開発し、またパネルの効率性を現在の20%から30%に上昇させる研究を実施して、300~400kmを走行させることを目標としている。これはテラヘルツ技術の一種の応用となる。

(トゥルチノヴィッチ氏) 私が所属している第2のグループは、電子ダイナミクスの他に、テラヘルツ技術の研究を実施している。特に、テラヘルツをセンシングに利用する



研究を実施している。エレクトロン等の他、データ通信に利用可能なマイクロ波等のアクティブな電波を検出することを目的としている。過去には、テラビット通信の研究を実施していたことがある。光ファイバ回線からテラヘルツ波の無線に変換し、さらにテラヘルツ波から光ファイバ回線に変換する。前者はともかく、後者はまだ誰も成功していない。この研究については論文を幾つか書いたので、読んでいただきたい。我々は光回線とテラヘルツの無線技術を組み合わせる研究を実施しており、同様の研究を実施している研究者と研究提携することを望んでいる。

(菱沼) NICT でも、光と電気との変換を行わずに、オール光で伝送損失を少なくし、超高速伝送を可能にする技術を研究している。電気に変換せず光のまま伝送するという意味で似ている。

(トゥルチノヴィッチ氏) その通り。無線とファイバ技術の間に電気が入ることなく、つなげることが重要であり、このために、我々はテラヘルツの研究を実施している。我々は国際特許を色々と取得しており、(光からテラヘルツへの変換関係では) 世界記録を出している。

なお、マックスプランク研究所に移る前、デンマーク工科大学に在籍した当時、米国サンディエゴで開催された「OFC (光ファイバ通信) 2009」で講演発表している。通信、距離は小さくなるが、オクラホマで 100m、狭帯域で成功したりしている。

(菱沼) OFC は、私も本部在勤時に理事長等とともに出席したことがある。

(トゥルチノヴィッチ氏) ところで、当研究所では、衛星通信で、200GHz にも活用している。衛星通信は空気が良いので問題が少ない。

(菱沼) NICT でも宇宙通信の研究を実施している。宇宙通信にテラヘルツを用いる発想は目を引く。

(トゥルチノヴィッチ氏) また、テラヘルツ波はピコセルに有用であり、データセンターにも活用しようとしている。現在のサーバ・ラックの後部は、光ファイバ回線がたくさん張りめぐらされている状態だが、これを、テラヘルツ波を用いてワイヤレスにしたい。テラヘルツ波は近距離では大変有効なので、サーバ・ラック間でテラビット級を実現し、グーグル、イーベイ、アマゾン等に使ってもらいたいと考えている。しかし、彼らは研究費を支援してくれる訳でなく、実現したら購入しようという方針なので、研究協力の相手を探している。ポータブルなデータ・キオスクを実現し、映画やDVDのダウンロードに有効である。

(菱沼) EUのプロジェクトはどうか。

(トゥルチノヴィッチ氏) EUからの資金は多くない。

(菱沼) NICTは自ら研究に取り組むとともに、他の研究機関に助成している。特に欧州委員会とは共同公募しており、将来ネットワーク(新世代ネットワーク)の分野で日欧の研究機関が協力することを条件として、欧州委員会が欧州側の、NICTが日本側の研究機関・大学・産業界等に助成している。このようにしているのは他にブラジルとロシアだけである。第2次公募も予定しており、11月にリトアニアで開催されるICT2013で説明予定である。

#### 【施設見学の後、トゥルチノヴィッチ博士の研究室にて議論・ヒアリング】

##### 先方組織の人員と予算規模について

(菱沼) あなたの研究グループの人員規模について教えていただきたい。

(トゥルチノヴィッチ氏) 私の超高速ダイナミクス・テラヘルツ分光法グループの人員は、私を合わせて7名である。

(菱沼) 1年間の予算規模はどのくらいか。

(トゥルチノヴィッチ氏) 予算はその年による。我々の研究グループはまだ新しく、マックスプランク・ポリマーリサーチ研究所からスタートアップ資金として、40万ユーロ支給され、この資金は機器設備のために利用された。その上、私は以前の勤務先の大学から機器を移動させている。我々の研究グループの機器にかかった総費用は50万ユーロであり、これは1回限りのものである。また、この機器の幾つかは他の研究グループと共有して利用している。残りの費用は人件費で、年18万ユーロ、また、流動的予算が年2万ユーロであり、マックスプランク・ポリマーリサーチ研究所と私のFP7 CIGで賄われている。

(菱沼) テラヘルツ技術に関して、非欧州諸国に研究パートナーを持つか

(トゥルチノヴィッチ氏) 米国と中国に研究パートナーを持つ。

#### FP7 Lighter プロジェクトについて

(菱沼) FP7のLighterプロジェクトは、FP7の「提携協同 (Cooperation)」のICT部門から助成されているわけではなく、「人材 (People)」のCIG (Career Intergration Grants) から助成されている。CIGとはどのような助成プログラムであるか。

(トゥルチノヴィッチ氏) CIGプログラムとは、研究者の人材育成に関わる助成プログラムであり、若手であるが、経験を積んだ研究者が他の欧州国で学部や研究グループの主導的地位を得ることを支援する。

(菱沼) 9月10日(火)にヒアリングしたフェルディナンド・ブラウン高周波研究所で聞いたのだが、CIGでは欧州以外から欧州に来た研究者を助成対象としていると聞いたが、貴方の場合はどうか。

(トゥルチノヴィッチ氏) 私はデンマークからドイツに来たので対象となっている。必

ずしも欧州外からが条件ではなく、他国から欧州内のいずれかの国に来たことが条件である。日本の研究者でも応募できる。

(菱沼) 同プロジェクトでは、テラヘルツ技術を利用して、どのような研究を実施しているのか。

(トゥルチノヴィッチ氏) 同プロジェクトでは、有機、無機半導体におけるキャリアダイナミクス、THz信号の超高速スイッチングとモジュレーション、スピンの超高速コントロール、超高速ファイバレーザ、ノンリニア型ファイバ光学（生物光学のアプリケーションとともに）等を研究している。より詳しくは、我々のウェブサイトを見ていただきたい<sup>62</sup>。

(菱沼) どんな課題に着目して取り組んでいるのか。

(トゥルチノヴィッチ氏) (電子)光モジュレーションの速度を原理的に限定すること、生体生物光学イメージング向けの全ファイバ・低ノイズ技術、ノンリニア型光物質インタラクションのダイナミクス観察である。

#### 先方の研究事例について

(トゥルチノヴィッチ氏) コイルで電磁気を発生させる際に、テラヘルツ波を用いて、電磁気を超高速でコントロールする研究をしている。

また、オールプラスチックのビニールでテラヘルツ波を処理する方法を特許取得した。論文は多数引用されている。テラヘルツ波をプラスチックで遮断するが、光と電波は見える（遮断しない）ので、携帯電話は可能である。また、テラヘルツ波については反射波なども計算して、室内で直進するだけでなく、反射波も見て考えている。

---

<sup>62</sup> [www.mpip-mainz.mpg.de/thz](http://www.mpip-mainz.mpg.de/thz)  
[www.ultrafast.dk](http://www.ultrafast.dk)

TDS（テラヘルツ時間領域分光法）に関しては、クリスタルを使って、TDS を改良する研究を実施している。化学センシングにテラヘルツはとてもいい。

（菱沼）NICT でも TDS の研究を行っている。また、テラヘルツ波を、絵画の非破壊検査、火災現場や原子力発電所事故現場等、人が立ち入れない場所の内部検査、トンネル・橋・建物の内部が古くなっていないかの構造検査等にも用いようとしている。

（トゥルチノヴィッチ氏）そのような長距離のテラヘルツのイメージングは当研究所では実施していないが、より近距離でのイメージングは研究している。テラヘルツ波によるイメージングで IC チップの誤りを検出しようとしている。テラヘルツ、サブミリ波に近いが、ホットスポットを検出するというアイデアがある。

以上の他、我々の研究グループは、光ファイバ、光レーザ、フォトニック・クリスタルファイバの研究を実施している。ノイズがとても少ないので、バイオ・フォトニック・イメージングの研究者はこのような技術を欲している。乳がんのイメージングなども応用対象である。これは胎児検査の超音波に似ているイメージングである。

以上の研究に関しては、私が書いた論文を差し上げるので、ぜひ日本の研究者の方に読んでいただきたい。

#### ドイツの研究開発体制について

（トゥルチノヴィッチ氏）私はマックスプランク・ポリマーリサーチ研究所の研究者であるとともに、まだデンマーク工科大学の教授でもある。デンマーク工科大学では光ファイバや光レーザの研究をしている。数年前にデンマーク工科大学から移ってきたので、現在はマックスプランクのフルタイムの研究者である。マックスプランク研究所には研究活動を実施するのに、様々な利点がある。

（菱沼）ドイツでは、ザールブリュッケンなど、大学構内にマックスプランク研究所や

フラウンホーファー研究機構がある等、研究機関と大学との連携が盛んに見える。このマックスプランク・ポリマーリサーチ研究所もマインツ大学の構内にある。

(トゥルチノヴィッチ) 同じ敷地にあるが、マックスプランク研究所は厳密にはマインツ大学とは独立した関係にある。もともと、当研究所と大学とは共通の大学院で単位を互換していたりする。当研究所の学生でマインツ大学から博士号を授与された者もいる。他にもアムステルダムの大学から授与される者がいるなど、マインツ大学をはじめとした大学からは色々と利益を得ている。大学も当研究所も、研究や教育を行う点は同じであるが、大きな違いは、研究所には学位を授与することがない点であり、この点で様々な大学と協力することになる。

#### テラヘルツ技術の開発の欧州の強みについて

(菱沼) アメリカでは、テラヘルツ技術の研究開発が軍事部門等で非常に進んでいると聞いた。あなたの考えでは、欧州における同技術研究の長所や強みとは何か。

(トゥルチノヴィッチ氏) 私は欧州で THz 研究が軍事利用と関係して実施されていると聞いたことがない。私の意見では、THz 放射を利用する基礎物理学は欧州の THz 研究の強みの 1 つであり、これは天文学から超高速光電子工学も含む。この他に、欧州の研究の強みの 1 つは、センシングと計量学であるが、私自身はこの分野の研究に深く関わっているわけではない。

#### 最後に

(トゥルチノヴィッチ氏) NICT と近い研究内容も多く、特に光無線や光ファイバ上でテラビット級のテラヘルツの分野で、ぜひ NICT の日本の研究者と協力していきたい。

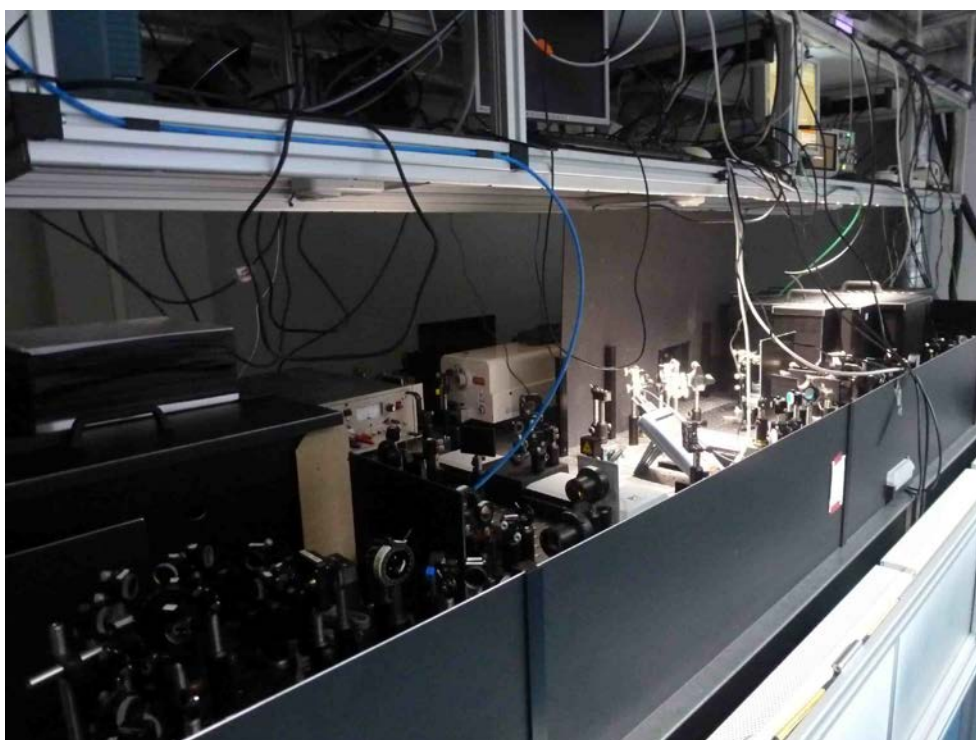
(菱沼) そのような要望を日本の研究者にお伝えしたい。

(トゥルチノヴィッチ氏) 参考になりそうな論文の白焼きをお渡しする。引用されるこ

とも多い。研究者に目を通してもらえれば、どのような研究をしているのか理解してもらえらると思う。当方の特許関係のウェブサイトをお伝えする<sup>63</sup>。

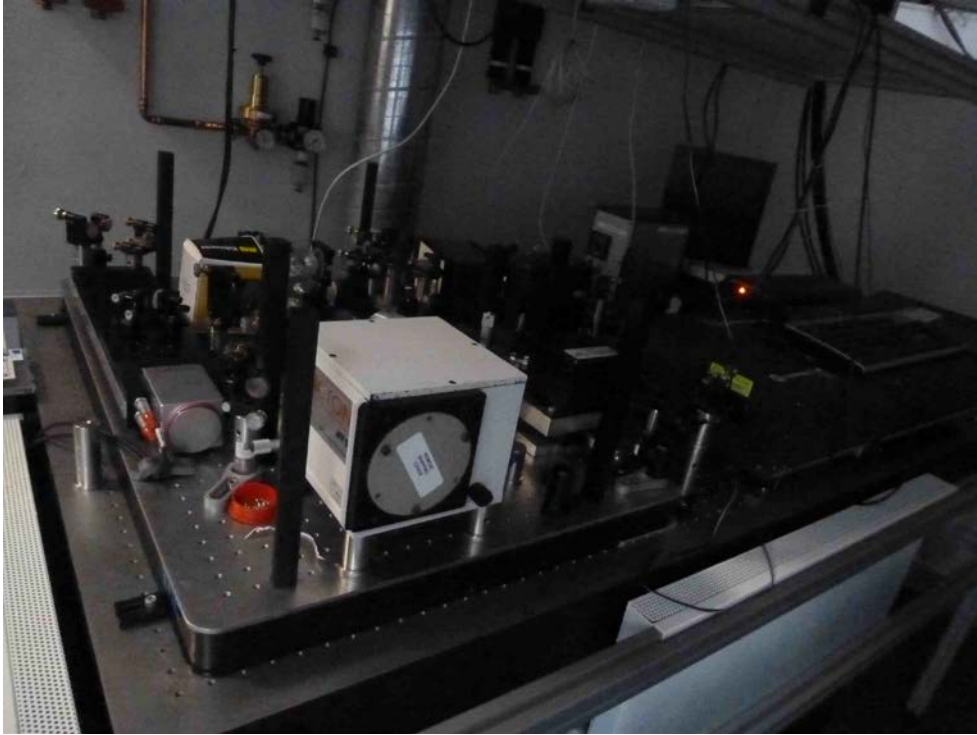
(以上)

写真 (菱沼撮影)

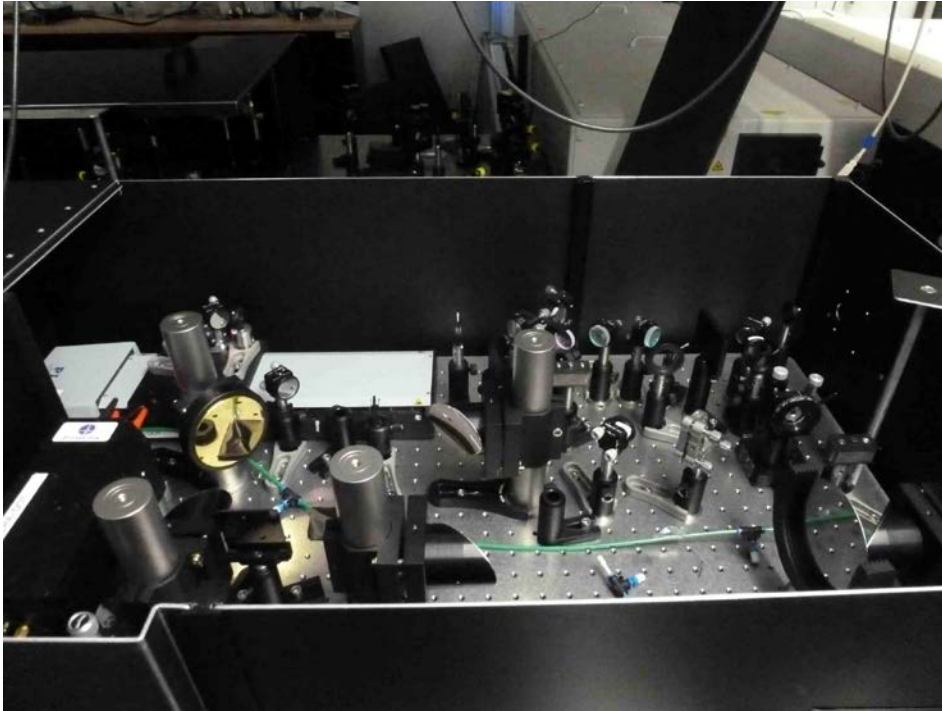


---

<sup>63</sup> <http://mainz-thz-group.weebly.com/patents.html>







#### Fraunhofer 協会・応用固体物理研究所とハインリッヒ・ヘルツ研究院

ドイツの Fraunhofer 応用固体物理研究所 (IAF)<sup>64</sup>は、1957 年にフライブルグに創設された Fraunhofer 協会の研究機関の 1 つである。同研究所は半導体技術に基づくマイクロ電子工学とオプト電子工学の研究開発を実施しており、特に III-V 族化合物半導体を利用したセキュリティ、エネルギー、通信、健康、交通部門への応用研究を実施している。2012 年の人員規模は 278 名であり、全予算は 3020 万ユーロである。テラヘルツに関しては、同研究所内の「ミリ波回路グループ」が研究を実施しており、600GHz 帯までを対象に高機能の回路を開発しているが、将来的には 1THz 帯も目標にしている。IAF とカールスルーエ工科大学 (KIT)<sup>65</sup>の研究グループが、テラヘルツ帯を使って超高速通信を行う研究プロジェクト、ミリリンクプロジェクトを実施してい

<sup>64</sup> <http://www.iaf.fraunhofer.de/en.html>

<sup>65</sup> <http://www.kit.edu/english/index.php>

る。

また、同じくフラウンホーファー協会の高インリッヒ・ヘルツ研究院でもテラヘルツの研究が実施されている。同研究院は、前身組織が 1928 年に創設され、特に通信システムの研究を実施している。テラヘルツに関しては、フォトニック部品部のテラヘルツ発生・検出グループ<sup>66</sup>が研究開発を実施している。特に、光伝導テラヘルツ発信機とコヒーレント受信機、フォトダイオード・ベースのテラヘルツ発信機、テラヘルツシステム制御専用設計された 1.5 mm レーザの集積チップ、ファイバ・ピグテール・モジュールへのチップのパッケージ化、完全にファイバ結合したテラヘルツセンサー・システムのアセンブリーと検査、テラヘルツの応用研究を実施している。

### その他（大学機関等）

以上の他、ドイツ惑星研究院<sup>67</sup>、ベルリン工科大学<sup>68</sup>、コンスタンツ大学<sup>69</sup>、レーゲンスブルク大学<sup>70</sup>でもテラヘルツの研究開発が実施されている。

## 第三節 フランス

フランスでも多くの研究機関でテラヘルツの研究が実施されている。以下に、ポリテクニク工科学校、大学機関、電子情報技術研究所（LETI）における研究開発動向について記す。

---

<sup>66</sup>

<http://www.hhi.fraunhofer.de/fields-of-competence/photonic-components/topics/terahertz-generation-detection.html>

同研究所の日本語のサイトも参照のこと：

<http://jp.hhi.fraunhofer.de/departments/photonic-components/topics/generation-and-detection-of-terahertz.html>

<sup>67</sup> [http://www.dlr.de/pf/en/desktopdefault.aspx/tabid-6825/11226\\_read-32067/](http://www.dlr.de/pf/en/desktopdefault.aspx/tabid-6825/11226_read-32067/)

<sup>68</sup> <http://www.tu-berlin.de/menue/home/parameter/en>

<sup>69</sup> <https://scikon.uni-konstanz.de/en/projects/2149/>

<sup>70</sup> <http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/huber/home.html>

<http://www.physik.uni-regensburg.de/TerZ/>

## ポリテクニク工科大学

フランスのポリテクニク工科大学では、光学・生物科学研究所でテラヘルツ技術に関連する研究が実施されている<sup>71</sup>。同研究所は、細胞と組織の中におけるプロテインの動きや機能組織を理解するための新しいコンセプトやツールをつくることを目的としており、その一貫でテラヘルツを利用する生物イメージングの研究開発を行っている。人員は全部で46名である。

テラヘルツの有利な点は X 線イメージングに比べて、フォトンエネルギーが低いおかげで、サンプルが痛むことが少ないことである。そのため、現在、テラヘルツの発生と検出のためにフェムト秒レーザ光伝導アンテナに基づくイメージング技術を開発している。

## フランスの大学機関：パリ第七大学ディドロ、モンペリエ第二大学、ボルドー第一大学

フランスの大学では、パリ第七大学ディドロ<sup>72</sup>の素材・量子現象研究所で、カルロ・シルトリ教授の下<sup>73</sup>、テラヘルツに関連する研究開発が実施されている。特に、カスケードレーザ、テラヘルツの発生と検出、テラヘルツ技術と電気通信技術の融合がテーマである。

モンペリエ第二大学では、ミシェル・ディヤコノフ教授 (Michel Dyakonov) とウオジシエク・クナップ教授 (Wojciek Knap) の下、テラヘルツ技術の研究が20年以上に

---

<sup>71</sup>

<http://www.lob.polytechnique.fr/home/research/advanced-microscopies-and-tissue-physiology/terahertz-imaging-and-spectroscopy/terahertz-spectroscopy-and-imaging-26041.kjsp?RH=1262884319908>

<sup>72</sup> <http://www.mpq.univ-paris7.fr>

<sup>73</sup> <http://www.mpq.univ-paris7.fr/spip.php?article275>

渡って積極的に実施されている<sup>74</sup>。2005年には、同教授が中心となり、フランスの国内外の組織が参加するテラヘルツ研究グループネットワーク、GDR 2987<sup>75</sup>「THz周波数帯の半導体ソースと検出器」が設立されている。なお、同教授は日本の東北大学の尾辻泰一教授とテラヘルツプラスモニックを利用する無線通信の研究を協同で実施している<sup>76</sup>。

ボルドー大学に設置されたアキテーヌ波動・物質研究所 (LOMA)<sup>77</sup>では、テラ・スラム (Tera Slam) グループがテラヘルツ技術の研究を実施しており、テラヘルツの光源、テラヘルツイメージング技術、その他、分光法に関する基礎研究が実施されている。特に、THz-TDSの研究を実施しており、150GHz～4THz帯を利用している。

#### 電子情報技術研究所 (LETI)

電子情報技術研究所 (LETI)<sup>78</sup>は、原子エネルギー・代替エネルギー庁 (CEA)<sup>79</sup>の傘下にある研究機関の1つで、フランスのグルノーブルに設置されている。同研究所では、マイクロ及びナノ技術の研究と、その無線通信システムや部品、生物学、医療、イメージング技術への応用開発を実施している。テラヘルツに関しては、特にイメージング技術の分野で、赤外線や可視光線、ミリ波、X線とともに研究開発が実施されている<sup>80</sup>。

### 第四節 ベルギー

ベルギーでは、IMEC とブリュッセル自由大学電子工学・情報学科 (ETRO) で積極

---

<sup>74</sup> <http://www.terapole.univ-montp2.fr/Accueil/>

<sup>75</sup> GDR は、仏語の Groupement De Recherche の略。研究集合体という意味。

<sup>76</sup> <http://www.jst.go.jp/inter/english/sicorp/country/france.html>

<sup>77</sup> <http://www.loma.cnrs.fr/SLAM/teraslam-terahertz-spectroscopy-and-imaging/>

<sup>78</sup> <http://www-leti.cea.fr/fr>

<sup>79</sup> <http://www.cea.fr>

<sup>80</sup> <http://www-leti.cea.fr/en/Discover-Leti/Innovation-platforms/Imaging-platform>

的にテラヘルツ技術の研究開発を実施している。両者は、同技術のため共同の研究所も創設している。

## **IMEC**

IMEC<sup>81</sup>は1984年に、特にマイクロ電子工学の研究開発機関として創設された非営利組織である。マイクロ・ナノ分野で欧州最大規模の研究機関であり、IMECの予算は約3億ユーロ（約400億円）である。様々な研究を実施しているが、無線通信に関しては、60GHz帯を利用した高速通信技術の研究開発を実施している<sup>82</sup>。IMECは、テラヘルツ技術に関して、ETROと共同研究開発を実施している。

## **ETRO：ブリュッセル自由大学の電子工学・情報学科**

ETRO<sup>83</sup>は、1971年にブリュッセル自由大学の工学部に設置された電子工学・情報学科である。同機関は、高等教育機関であるとともに、積極的に研究開発を実施しており、産業との結びつきも強い。研究開発に関しては、マイクロ・光電子工学、スピーチ・聴覚処理、多次元信号処理と通信に関する3つの研究所がある。

テラヘルツ技術に関しては、マイクロ・光電子工学研究所（LAMI）に設置されたミリメートル・テラヘルツ波研究グループ<sup>84</sup>で研究開発が実施されている。人員は、博士課程の学生を合わせて、26名である（ウェブサイト情報）。研究テーマとしては、テラヘルツ波を利用する物性評価、画像化技術と非破壊検査、電気通信とセンサー技術がある。

---

<sup>81</sup> [http://www2.imec.be/be\\_en/home.html](http://www2.imec.be/be_en/home.html)

<sup>82</sup> [http://www2.imec.be/be\\_en/research/wireless-communication/60ghz-wireless-communication.html](http://www2.imec.be/be_en/research/wireless-communication/60ghz-wireless-communication.html)

<sup>83</sup> <http://www.etro.vub.ac.be/>

<sup>84</sup> [http://www.etro.vub.ac.be/Research/LAMI/Millimeter\\_Waves/](http://www.etro.vub.ac.be/Research/LAMI/Millimeter_Waves/)

なお、LAMIはヨハン・ステイン教授の下、IMECと提携して研究開発を実施しており<sup>85</sup>、BISENS（ブリュッセル統合センサー研究所）<sup>86</sup>という共同研究組織を創設し、ミリ波及びテラヘルツ（30GHz～3THz帯）の統合センサーの研究を実施している。

ETRO を訪問し、同組織におけるテラヘルツの研究開発体制と活動と同プロジェクトの概要について伺った。以下に、そのヒアリング議事録を収録する。

### ヒアリング議事録 / ETRO

#### *日時：*

2013年10月23日（水）午後2時30分～午後3時45分

#### *場所：*

ベルギー・ブリュッセル（先方事務所）

#### *参加者：*

先方：ブリュッセル自由大学 電子情報学部（BUV ETRO）マイクロ・光電子工学研究所（LAMI）<sup>87</sup> 兼 BISENS（ブリュッセル統合センサー研究所：ETROとIMEC

の共同研究所）責任者：ヨハン・ステイン教授

当方：情報通信研究機構（NICT）：欧州連携センター長 菱沼宏之

---

<sup>85</sup> <http://www.etro.vub.ac.be/RESEARCH/LAMI/>

<sup>86</sup> <http://vubtechtransfer.be/success-stories/etro-imec/>

<sup>87</sup> [http://www.etro.vub.ac.be/Research/LAMI/Millimeter\\_Waves/](http://www.etro.vub.ac.be/Research/LAMI/Millimeter_Waves/)

#### 4. ヒアリングの概要：

##### はじめに

(菱沼) 10月11日、独ニュルンベルクでの欧州マイクロ波週間において、貴方がテラヘルツ関係の講演を行った際にもお会いした。

(ステイン氏) その通り。なお、今年9月にマインツで開催されたミリ波、テラヘルツ波の国際会議では私の学生が発表しており、彼の発表は学生発表の中で3位に入賞した。

(菱沼) 【NICTの研究開発の概要（4つの技術分野を対象としていること、研究開発と研究助成活動を行っていること、EUとの共同研究公募を実施していること、テラヘルツ研究センターの設立と研究内容）を説明】

(ステイン氏) テラヘルツ技術について、ぜひETROとNICTの双方向で協力していきたいと思っている。

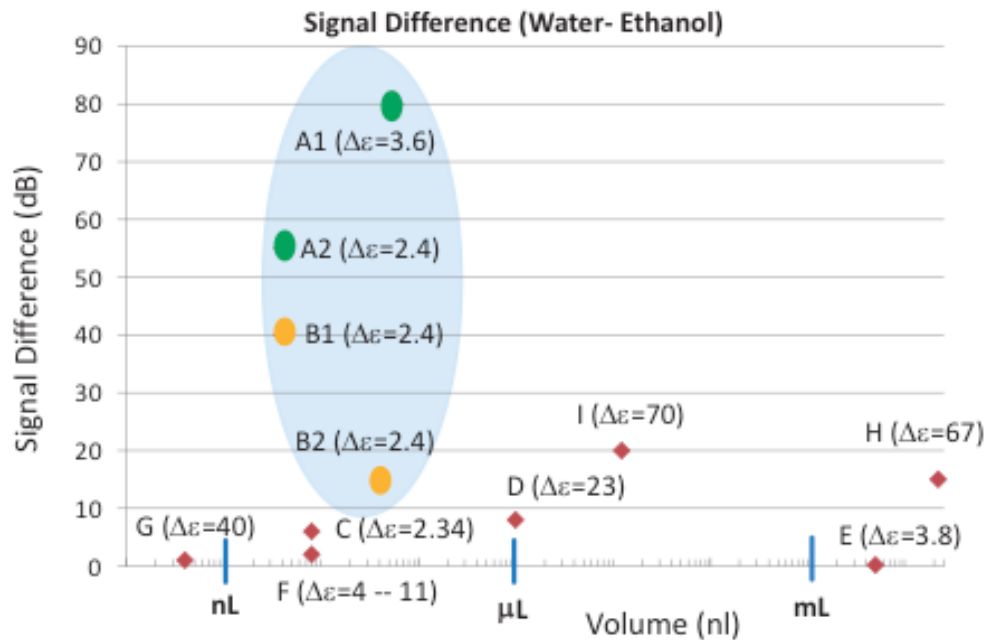
##### 先方組織の主な研究テーマについて

まず、テラヘルツ分野に関するETROの世界最高水準の研究は、 $0.1 \times 0.1 \times 0.1 \text{mm}^3$ の箱（nl：ナノリットル）に対するテラヘルツ反射信号による水とエタノールの相違の検出が、世界の他機関の記録である100分の1（20dB）に比較して、1億分の1（80dB）と、100万倍優れている点である。

図版：テラヘルツセンサーによる水とエタノールの検出データ



## Benchmarking: H2O-alcohol mixtures



October 11, 2013

EuMW2013

9

出典 ETRO LAMI (2013年欧州マイクロ波週間資料より)

実験で 10,000 分の 1 (40dB) と 10 ~100 万分の 1 (55dB) を達成し、理論上は 1 億分の 1 (80dB) を達成している。理論値も実験により証明されうる。これは非常に驚異的な数値であると思う。このセンサーによる検出技術は、生体物質 (BM) や粒子状物質 (PM)、DNA、タンパク質、抗体、抗原の検出に応用できる。

正確にはテラヘルツ分野ではないが、ETRO における研究の第 2 の世界最高水準はレーダである。f=10GHz で、正確性 (解像度) が  $10 \mu\text{m} = \lambda / 3,000$  ( $\lambda = 30 \text{ cm}$ ) である。一般に車のレーダ 79GHz で 1 cm の解像度が  $1 \text{ cm} = 20 \times \lambda$  なので、その差は実に 60,000 倍に上る。

これら 2 つの世界水準の件は、論文で発表しておらず、特許にしている。現在商用化



を考えており、企業を探しているところである。

その他、テラヘルツ技術ではないが、ETRO の第 3 の特徴は、グラフェン (graphene) である。グラフェンと人間の脳の研究は欧州で最も重要視されている分野で、これらの研究だけが、EU のホライズン 2020 で 10 億ユーロ以上の予算を予定されている。

#### 先方組織の概要について

(菱沼) 研究グループの人員を教えてください。

(ステイン氏) ETRO に 100 名以上の常勤研究者がおり、テラヘルツ及びミリ波関係の研究者は 14 名である。

(菱沼) 年間予算を教えてください。

(ステイン氏) 予算は人件費と運営費用として、年間 100~150 万ユーロである。他に、年々によって変動が大きいですが、テラヘルツの機器購入費用が 100 万ユーロ程度である。主な収入源は、ブリュッセル自由大学、フランダース地域政府、ブリュッセル地域政府、ベルギー政府、欧州委員会 (FP7 など) で、産業界からも少し収入がある。

#### テラヘルツ技術の研究について

(菱沼) テラヘルツの定義をどう考えるか。

(ステイン氏) テラヘルツの定義として 100GHz~10THz というのは、その通りだと思う。

(菱沼) ETRO では、基礎研究 (測定技術、標準化等) と応用研究 (イメージング、センシング) のどちらを実施しているのか。

(ステイン氏) ETRO は、むしろセンシングやイメージングという応用研究を実施している。もちろん、研究過程で基礎的問題を解決しなければならない場面は出てくる。

なお、標準化活動は行っていない。

(菱沼) 275GHz~1THz 帯において、無線通信、レーダ、電子デバイス、回路、アンテナ等を開発しているか。

(ステイン氏) レーダ (前述)、テラヘルツのデバイス (スイッチによる調整で Yes/No を切り替える)、アンテナ (テラヘルツ導波管) を研究開発している。周波数帯はだいたい 275GHz~1THz 帯である。無線通信や回路の研究開発は行っていない。

(菱沼) テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) を開発しているか。

(ステイン氏) ETRO では THz-TDS は扱っていないが、THz-TDS は欧州が非常に強みのある研究分野である。

#### IMEC について

(菱沼) IMEC と協力しているか。また、IMEC とは何か。

(ステイン氏) IMEC は、ちょうど NICT のような公的研究機関であり、マイクロ・ナノ分野で欧州最大規模の研究機関である。IMEC の予算は約 3 億ユーロ (約 400 億円) である。IMEC の場所はブリュッセルから 50 km 以内である。自分は、ETRO の教授であるとともに、IMEC との共同プロジェクトのコーディネーターでもある。ETRO と IMEC は共同研究所を持ち、BISENS (ブリュッセル統合センサー研究所)<sup>88</sup> と呼ばれており、ここブリュッセルにある。私がこの研究所の責任者である。

(菱沼) 昨日 10 月 22 日、フランス・グルノーブルのミナテック (Minatec) を訪問してきたが、そちらもマイクロ・ナノ技術の集積地である。

(ステイン氏) 存じている。

#### 国外の研究パートナーについて

(菱沼) FP7 等の EU のプロジェクトに参加しているか。

---

<sup>88</sup> <http://vubtechtransfer.be/success-stories/etro-imec/>

(ステイン氏) EU のプロジェクトに参加している。また、ESF (European Science foundation) や欧州宇宙機関 (ESA) と繋がりがある。

(菱沼) 欧州諸国以外と研究で連携しているか。

(ステイン氏) 欧州以外では、北アフリカ諸国、チュニジアとリビアと協力しているが、小規模な協力である。

#### テラヘルツ波の強みについて

(菱沼) ミリ波等と比較したテラヘルツ波の強みと弱みは何と考えるか。

(ステイン氏) ミリ波等との比較では、透過度と解像度がある。透過度と解像度の関係は相反しており、赤外線は解像度が高いが透過度がほとんどない一方、ミリ波は透過度が高いが解像度がほとんどない。テラヘルツ波はその間に位置し、透過度と解像度のバランスが取れている。

#### ITU-R や ETSI におけるテラヘルツ帯の利用割当及び標準化について

(菱沼) 国際電気通信連合無線通信部門 (ITU-R) や欧州標準化機構 (ETSI) でのテラヘルツ波の標準化の議論を何か承知しているか。

(ステイン氏) 少し調べてみただけの段階だが、ITU-R や ETSI での議論は承知していない。

#### 欧州のテラヘルツ技術研究の強みについて

(菱沼) テラヘルツ技術において、米国等と比較した欧州の強みは何か。

(ステイン氏) 欧州の強みは、①TDS (時間領域分光法)、②量子カスケードレーザ、③ボディスキャナ (100~500GHz)、④宇宙関係 (ESA の存在が大きい)。

#### その他

(ステイン氏) 現在、テラヘルツ関連技術の商用化の議論を行っており、富士通や NTT

をはじめ、日本の企業を紹介してほしい。また、NICTとも協力していきたい。(当方の成果を示してもらえれば、研究者に分かってもらえると思う。)

商用化に関連している2人を紹介する。

- ・ マルク・ヴァン・ロンパイー創業者・社長 アクアンティス・サー
- ・ ブリュッセル自由大学 (BUV) 電子情報学部 (ETRO) ビジネス・ディベロッパー  
ケビン・ドゥーヴェン

#### **第四章 ICT イベント視察レポート：欧州マイクロ波週間 (EuMW) におけるテラヘルツ技術のワークショップ**

2013年10月6～11日にかけて、ドイツのニュルンベルクで欧州マイクロ波週間が開催され、テラヘルツ技術のワークショップもその一貫で行われている。このワークショップでは、日本を含め世界各国からテラヘルツ技術の研究者が集まり、研究発表を行っている。

**【ワークショップタイトル：通信・センシング・分光におけるテラヘルツのシステム・部品】**

日時：2013年10月11日（金）午前8時30分～午後5時30分

場所：ニュルンベルグ会議センター（ドイツ・ニュルンベルグ）

参加者：NICT 欧州連携センター長 菱沼宏之

##### 0. 司会

自分はフランクフルトとベルリンで教鞭を取ったことがある。本日は米国の講演者が来られなくなったため別の人に来てもらった。CMOS（相補性金属酸化膜半導体）関係である。

## 1. 「THzアレーとその応用」：イムラン・マーディ氏及びエマニュエル・デクロッサ氏

NASA JPL (米航空宇宙局ジェット推進研究所) の 1.9THz のアプリケーションを紹介したい。アプリケーションは、宇宙、防衛、商用に分かれる。THz の放射をどう検出するかが問題である。ヘテロダイン受信機とボロメータ検出器がある。前者は、ソースに電気と光があり、検出器は冷温と室温向けとがある。

宇宙部門のアプリケーションのためにアレーを構築したい。CMOS は成熟しているし、安価である。目標は強固なアレー受信機の開発であるが、テラヘルツではアレー源を作るのが大変である。宇宙部門のアプリケーションのテラヘルツ源は、2 端末の発振器 (Oscillator)、アンプ、BWO (後進後波管)、FIR (有限インパルス応答) レーザ、フォトリソ、SCL 等がある。増幅器の開発では、強固なダイオード製作が必須となる。JPL の飛行で証明されたダイオードや、1THz 超のデバイスを紹介する。局部発振器 (LO) 源がどうアレー受信機を使用するか。

(質問) 出力をどう計測したか。

(回答) Yファクタで計測した。

## 2. 「100GHz以上の低コストシステムの開発」：イエス・グラハル氏 (マドリッド工科大学)

100GHz 以上、例えば 300GHz で作動する低コストのシステムを開発しており、セキュリティが挑戦課題である。

テラヘルツ技術のアプリケーションの研究として、スタンドオフのイメージング・レーダを開発している。ピクセルベースのテラヘルツイメージング・システムは、高い解像度を得られる大型アンテナの期待できる代替手段である：40×40 mm。

300GHz における CW-LFM (連続波 - リニア周波数変調) 高解像度レーダを開発した (1 cm×1 cm)。その解像度は 1.11cm~1.5cm であり、低コストで実現できた。

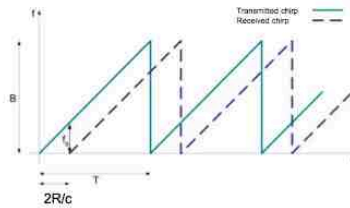
図版



## CW-LFM radar system at 300 GHz: Preliminary specifications

Parameter	Value
Central frequency ( $f_c$ )	300 GHz
Bandwidth (B)	27 GHz
Waveform	Sawtooth
Chirp period	54 ns – 1.5 ms
Theoretical range resolution ( $\Delta R$ )	1.11 cm*
Cross resolution	1.5 cm
Average transmitted power ( $P_{avg}$ )	0 dBm
Horn antenna HPBW	12°
Polarization	Linear (Vertical)
Noise figure (NF)	13.2 dB
Sampling frequency ( $f_s$ )	40 MHz

\* Measured at -5dB - Hanning windowing



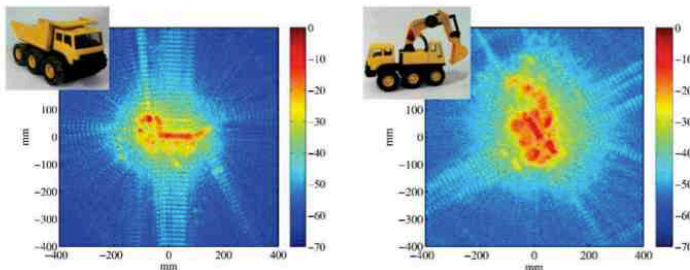
出典 欧州マイクロ波週間配布資料

また、100GHz における CW-LFM レーダでは、ハードウェアを再活用した。これは、ATR（減衰全反射法）向けの ISAR（逆合成開口レーダ）のイメージングであり、生物関係センシングのためのバイオ・レーダとしても活用できる。

図版



## CW-LFM radar system at 100 GHz: ISAR imaging for ATR

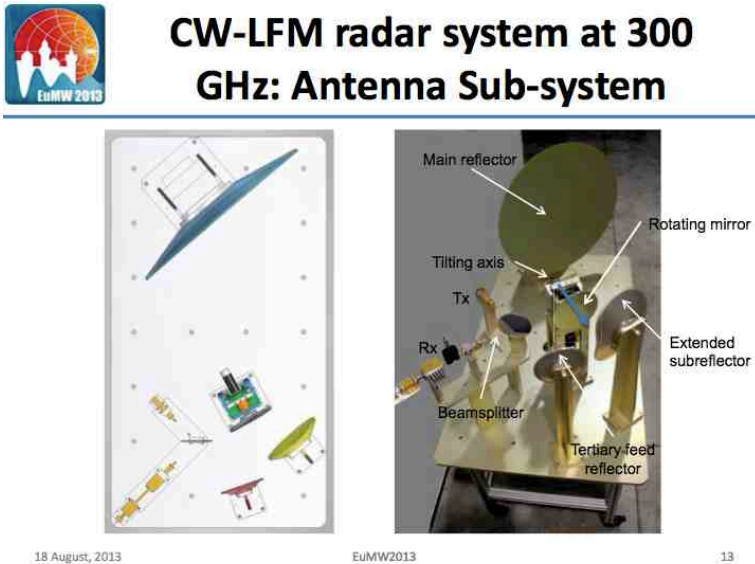


- Model targets scaled by 1:32.
- Rotating on a turntable at constant speed: 15 s/rev.
- Algorithms:
  - Polar Formatting Algorithm (PFA)
  - Background removal
  - Calibration to compensate nonlinearities of the transmitted signal

出典 欧州マイクロ波週間配布資料

デジタル電気とマイクロ波・ミリ波をどう分けるか。そのためには、300GHzにおける CW-LFM 高解像度レーダにおいて、アンテナ・サブシステムが重要である。ピクセルに出力を集中させ、0.5~1mW とした。解像度は1~1.3 cm以下である。人体のセキュリティ向けのレーダとして、300GHzにおける CW-LFM レーダが使えるし、感度も良い。例えば、腹部の服の下に防弾用の鉄板が隠れているのを検出できる。

図版



出典 欧州マイクロ波週間配布資料

新しい挑戦としては、電気温度計測モデル、物理ベースのデバイス・モデル、3D の熱・温度 (Thermal) シミュレーション、ガリウムヒ素 (GaAs) を計測することである。

結論と教訓として、COTS (汎用部品) 要素を使用した CW-LFM レーダの開発を進めている。様々な目的とアプリケーションに使用可能なデザインにしている。イノベーション

ョンの要素としてアンテナ・サブシステムを開発している。センサーの能力が限定されたサブシステムを特定する特徴を有している。高周波における回路の最適化のための新たな CAD（コンピュータ支援設計）ツールが必要とされている。

### 3. 「W35 THz 通信、センシング、イメージングのための高度統合 MMIC」：ハーベル・ジラス氏（スウェーデン・チャールマス工科大学及びエリクソン）

携帯電話のデータトラフィックが急増しており、この問題を解決するのが研究目的である。110-170GHz の D 帯と 220-325GHz の H 帯を利用する携帯電話、無線 LAN、無線 PAN を開発する。挑戦課題は、容量・速度の点とバックホールをどうするかというものである。

DHBT（二重ヘテロ接合バイポーラトランジスタ）と HEMT（高電子移動度トランジスタ）を比較すると、前者 DHBT は 150GHz で雑音が 5dB 以下と低い。HEMT は製造が迅速・安価になった。

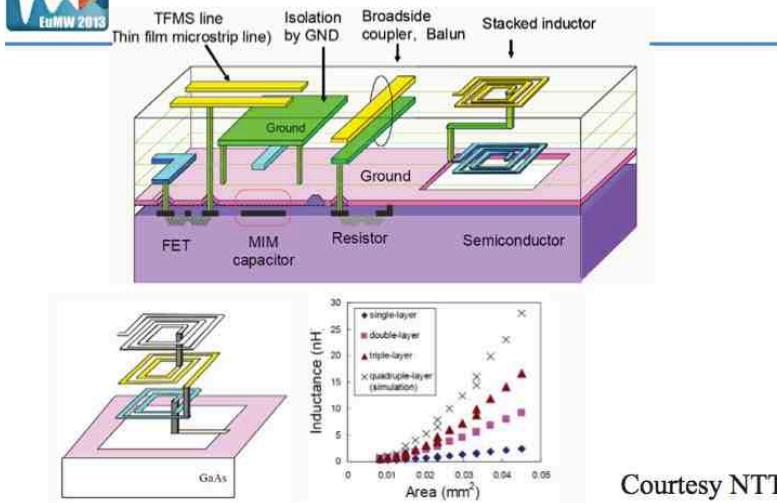
NTT が導入した 3D MMIC（モノリシックマイクロ波集積回路）コンセプト、テレダインの 250 ナノメートルの InP（リン化インジウム）DHBT MMIC デザイン・プログラムを利用する。

図版





### 3 D MMIC concept (Introduced by NTT)



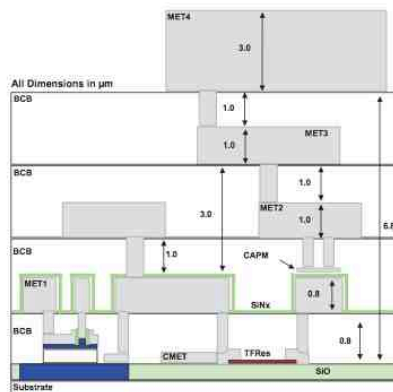
Courtesy NTT



### InP DHBT-Technology used in this work

Teledyne: TSCHBT 250 nm InP DHBT Dielectric layers in BCB

Denser integration possible, because the dielectric layers are 50 times smaller → 5-10 times denser integration possible as compared to standard MMIC technology! Each layer is 2 μm thick



Representative cross-section of TSCHBT IC technology. Drawing is not to scale.  $f_c = 400$  GHz, and  $f_{max} = 600$  GHz @  $J_E = 5$  mA/μm<sup>2</sup>,  $V_{CE} = 1.5$  V, for a 0.25x5 μm<sup>2</sup> device. MSI-LSI integration level: some thousand active devices.

出典 欧州マイクロ波週間配布資料

結論として、テレダインの 250 ナノメートルの DHBT MMIC 技術混合器、増幅器、発振器、アンテナ、周波数増幅器を含めた受信回路が、将来のミリ波・サブミリ波アプリケーション用として証明されたことが挙げられる。

将来の統合としては、340GHz でのスタンドオフの検出に必要なアクティブな FMCW (周波数変調連続波) のイメージング・アレー向けのアンテナ、混合器、周波数増幅器、

発振器を含めたマルチピクセルの MMIC (モノリシックマイクロ波集積回路) が考えられる。D 帯通信での受信機・送信機のチップセットや、220GHz での 100Gbps のミリ波無線通信向けのベースバンド混合信号回路と、周波数フロントエンド MMIC との統合のプロジェクトを実施している。また、アナログとデジタル回路で、BA 変換器、単一レート変換器、スキャンニング検出、イメージングを行っている。

(質問) 雑音はどうしたか。

(回答) 雑音は分類しなかった。

(質問) D 帯の検出器は良かったか。

(回答) LNA (低雑音増幅器) のゲインを増加させた。

(質問) 基板は何か。

(回答) 鉄板である。

#### 4. 「センシングアプリケーション向けのヘテロ統合 MMIC」 : W ハイブリット氏、C クロツァー氏 (フェルディナンド・ブラウン高周波研究所 (FBH))

100-500GHz のセンシングのアプリケーションは、非侵襲であり、セキュリティや宇宙部門等で用いられる。異種融合技術プラットフォームで、機能性、運用性、接続性が改善される。関連プログラムには COSMOS がある。

FBH で開発された InP-HBT を IHP (ライプニッツ・イノベーションマイクロ電子工学研究院) の BiCMOS と結合するアプローチを採用する。技術的な挑戦課題は、Si-BiCMOS-Wofer (シリコン - バイポーラ相補性金属酸化膜半導体 - 低温専用スピーカ) 等。シリコン (Si) 層とリン化インジウム (InP) 層、96GHz の出力増幅器パワーアンプ、82GHz の SiGe (シリコン・ゲルマニウム) の BiCMOS VCO (電圧制御発振器)、164GHz の InP DHBT 周波数倍増機、300GHz の DHBT InP との発振器 (Oscillator) を研

究している

結論として、技術面では Wafer ベースで  $10\mu\text{m}$  以下の正確性を実現、技術的に最適化を実現する。FBH と IHP により、CMOS 上のリン化インジウム (InP) 技術プラットフォームが確立される見込みである。

#### 5. 「MOSFETs を利用するマイクロ波から 9THz にかけてのテラヘルツセンシングとイメージング」：H.G.ロスコス氏 (ゲーテ大学：フランクフルト)

テラヘルツカメラの開発、MOSFETs (電界効果トランジスタの一種) 検出器: TeraFETs、THz 分光の研究について紹介する。

テラヘルツ検出器に関して、障がいはポロメータ (細孔径分布評価装置) である。リアルタイム・イメージングのためのテラヘルツカメラについて、富士通と協力してきたが、最近ロシアの企業 (TeraSense) も出てきた。FET (電界効果トランジスタ) により、テラヘルツ放射を検出する。低周波と高周波で少し異なる。TeraFETs の実施は、アンテナ・パッチにテラヘルツを照射する。

テラヘルツイメージングに関しては、スペクトルに焦点を当てて、レーザでスキャンする方法を用い、リアルタイム (16fps: 毎秒 16 フレーム) の 590GHz 向け TeraFET カメラを開発している。

ヘテロダイン検出のテラヘルツイメージングと、統合 LO (局部発振器) 出力発生器に向けて、639GHz の副調合検出器を開発している。

結論として、MOSFET は、0.2~9THz の放射を検出可能である。

#### 6. 「40Gbit/s データレートまでの 240GHz 帯での二点間通信」：イグマール・カルファス氏 (シュツットガルト大学)

光ファイバ網を無線網に拡張し、シームレスな通信を可能にすることを目標とする。

応用シナリオとしては、固定通信と無線通信のリンク、電気通信基地局での利用（バックホール、ピコセル、ラストマイル）、PAN 向けの無線が考えられる。

光ファイバによる通信が大変な場合（ケーブル敷設困難等）、テラヘルツ波を2点間通信に活用できる。240GHzで1.1 kmを実現できた。フラウンホーファー研究機構IAF（応用固体物理研究所）、カールスルーエ工科大学（KIT）、シーメンス等が開発した。35nmのmHEMT（高電子移動トランジスタ）。IAFが開発したmHEMTは1THz超を可能にした。240GHz帯は容易ではないが、周波数増幅器で実現した。また、10dBの変換利得を実現した。240GHz受信機では、あまり努力しなくても220～260GHzを実現した。240GHzの送信機を開発した。

送信の実験に関しては、実験室で試行した（40mまで距離）。受信機の感度は、40Gbpsまでは誤り率が $1.7 \times 10^{-4}$ 以下、最大の受信機感度は-32～-30dBmであった。

実験室では、アンテナ利得が中程度である。アンテナ利得が55dBi、HPBW（半電波強度ビーム幅）が0.325度、1.1 kmのPSK（位相偏移変調）送信を12GBdで。BPSK（二位相偏移変調）で24.9%、QPSK（四位相偏移変調）で22.7%のEVM（エラーベクトル振幅：変調精度）。

結論として、240GHzの送受信機のチップセットを実現した。実験室内40GbpsでBPSKにより40m、屋外24GbpsでQPSKにより1.1 kmを実現した。

なお、同研究はドイツ連邦研究教育省から助成されたミリリンクプロジェクトで進められた。

## 7. 「テラヘルツ無線通信の進展と将来」：ジョン・フェデリッチ氏（ニュージャージー工科大学）

1年半で無線通信の需要が倍増する中、需要が容量を超えてしまう。スマートフォン

の存在が大きい。1G~4G は 760MHz-2.6GHz だが、将来的には、100GHz 帯と 250GHz 帯が利用されると思われる。

テラヘルツ通信の特徴は、容量の増加、2点間、安全な通信が可能、天候によって低減衰（アテニュエーション）、移動時に高いアンテナ利得が必要とされている。ラストマイルやファーストマイルで、光ファイバ敷設が難しい場合に使われる。

テラヘルツ通信の安全性について、衛星テラヘルツ通信の例で示す。衛星同士で 25 kmの距離で可能である。

テラヘルツの発信源と検出を研究している（注：テラヘルツの速度記録：長妻・平田・山口各氏の名前も見られる）

外部調整器と THz-TDS の研究を実施している。同じ光レーザを発信と受信で使用した。フォトダイオードの研究（日本の平田氏の例）、光増幅器により実現した例を紹介する（光電：光コムの場合、ファイバ上の周波数システム、平田氏の成果、A-L/ニュージャージー工科大学の 625GHz リンク、2組の（duobinary）調整フォーマット、誤りなしの送信を実現した（10<sup>-3</sup>の誤り率が 10<sup>-15</sup>になり得る））。

天候の影響、雲中のシンチレーション（電磁波の振幅などの不規則な変動：scintillations）について研究した。塵や霧の影響に関しては、テラヘルツ波・赤外線から光ファイバにつないだ場合、減衰は小さく、40dB くらい。赤外線は霧にブロックされる。シンチレーションの効果はどうか。塵の影響は、時間の経過とともに減衰が小さくなっていく。テラヘルツ波では周波数が上がると減衰が高くなる。空気の錯乱の影響も実験した。

結論として、高周波は需要を満たす。光電、周波数増幅源・ダイオード、MMIC、量子カスケードレーザなどのテラヘルツ関係のシステムの性能が示された。様々な大気の状態の中で、テラヘルツは赤外線よりも良い性能を示す。小さく調整可能なアンテナ、

ビーム形成、テラヘルツ部品パッケージは、移動無線の中でのテラヘルツの性能を示す。

(質問：NTT) 塵の中の減衰の塵の材質は。

(回答) 塵に類似したもの。

(質問) 実験場所、窓は 30 cm だが、実際の直径は。

(回答) 否、ビームとテラヘルツは同じ直径で計測した。

8. 「FP7における高スループット・受動ミリ波（人体）セキュリティスキャナー」：ナオミ・アレクサンドル氏（スペイン・アルファ・イメージング社）

アルファ・イメージング社は、GATE 社と英リーディング大学の研究により設立され、セキュリティスクリーニングのため受動ミリ波イメージング機器を開発している。EU の第七次枠組計画（FP7）のプロジェクトに幾つか参加している。

「IMAGINE」プロジェクトは、2010 年 1 月に開始した（研究期間：29 ヶ月間）。全予算は 150 万ユーロで、その内 EU 拠出分が 110 万ユーロである。プロジェクトでは、94GHz のラジオメータ・チップセット、高性能、低コストアンテナを開発し、94GHz で 22dBi の利得がある。また、高性能・低費用材料（LCP）を製造している。

FP7 ICT の「NANOTEC」プロジェクトは、2011 年 9 月に開始し（研究期間：47 か月）、全予算 970 万ユーロ、その内 EU 拠出金は 660 万ユーロである。同プロジェクトでは、新しい高周波、ミリ波システムに向けた新しいアプローチを開発し、10-140GHz のアプリケーションを GaN/GaAs/SiGe（窒化ガリウム/ヒ化ガリウム/シリコンゲルマニウム）の MEMS-IC（微小電気機械システム-集積回路）で実現した。「NANOTEC」の DEM#2（デモンストレータ 2）は、94GHz でパッシブなイメージングを実現した。

FP7 セキュリティの「XP-DITE」プロジェクトは、2012 年 9 月に開始し（研究期間：55 か月間）、全予算 1,460 万ユーロ、その内 EU 拠出分が 1000 万ユーロである。空港の次

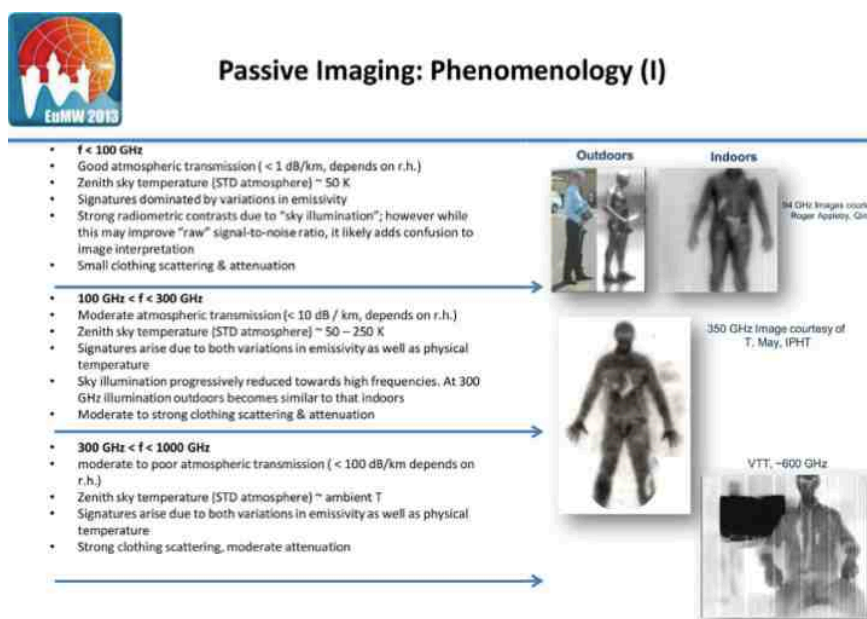
世代危険物探知器を開発することを目的とし、2つの空港で試験を実施する予定である。

FP7 セキュリティの「TeraSCREEN」プロジェクトは、2013年5月に開始（研究期間：42か月間）、全予算480万ユーロ、その内EU拠出分は350万ユーロである。高性能、非侵襲、安全、プライバシーの問題のないアクティブなイメージング技術を開発する。

9. 「受動、ビデオレートのサブミリ波の誤った色のイメージング：最新の研究開発」：アルチュ・ルーカネン氏（フィンランド・VTT技術研究センター）

小売業者や倉庫は窃盗に注意している。100GHz以下、100GHz-300GHz、300GHz-1000GHzでのパッシブ・イメージングに違いがある。

図版



出典 欧州マイクロ波週間配布資料

パッシブ・イメージングで、ポケット中の拳銃を検出できる。パッシブなサブミリ波のイメージングによる検出技術には色々な方法があるが、コヒーレントでない（干渉可能でない）直接方式を選択した。

FP7 の「IMSK」プロジェクトでは、セキュリティ向けのイメージング技術を研究し

ており、低温、光、検出器のアレーの研究を実施している。屋外での実証実験を行った。

NEDC（コンスタント雑音等価誘電）で物質を見分けられるか研究しているが、妥当である（Plausible）。STIR の検出器の開発もしている。クライオジェニック検出器により、パッシブなビデオ・レートでのイメージングは可能である。

10. 「3D テラヘルツ技術を用いる航空マルチレイヤー部品構造の検査」：ヨハン・ヨヌシェイ氏（王立軍事大学：ベルギー）

テラヘルツを利用する FMCW レーダ技術及びイメージ処理技術を開発する。

図版

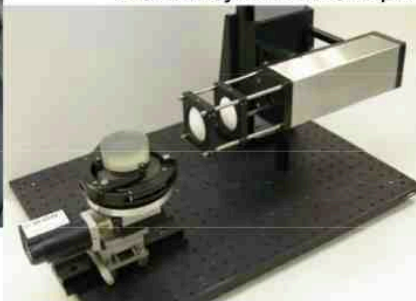


## Terahertz FMCW Radar Technique



Reflection and transmission setup for flat samples

Reflection setup for rotation symmetric samples





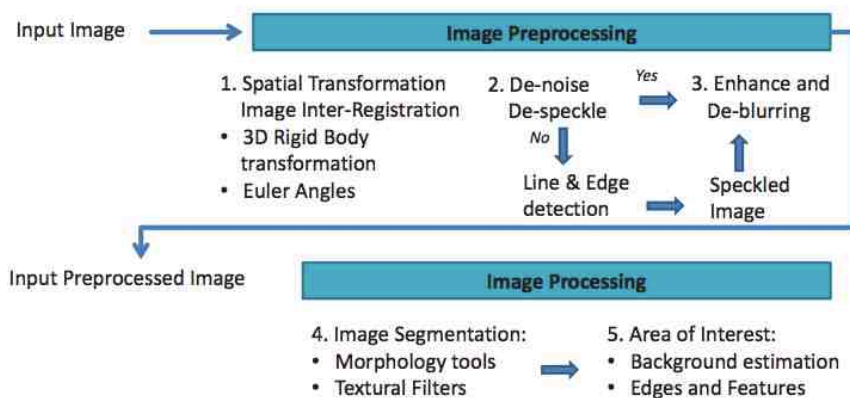


## Terahertz FMCW Radar Technique

Specifications			
Technology	All electronic		
Time per Pixel	250 $\mu$ s		
Dynamic range	> 50 dB und 1:300 (< 1 s)		
Working Frequency	100 GHz	150 GHz	300 GHz
Frequency bands	70 -110 GHz	110 – 170 GHz	230-320 GHz
Lateral resolution	3 mm	2 mm	1 mm
Depth resolution	6 mm	5 mm	3 mm
Penetration depth	Few cm, material depending		



## Image Processing - Scheme



出典 欧州マイクロ波週間配布資料

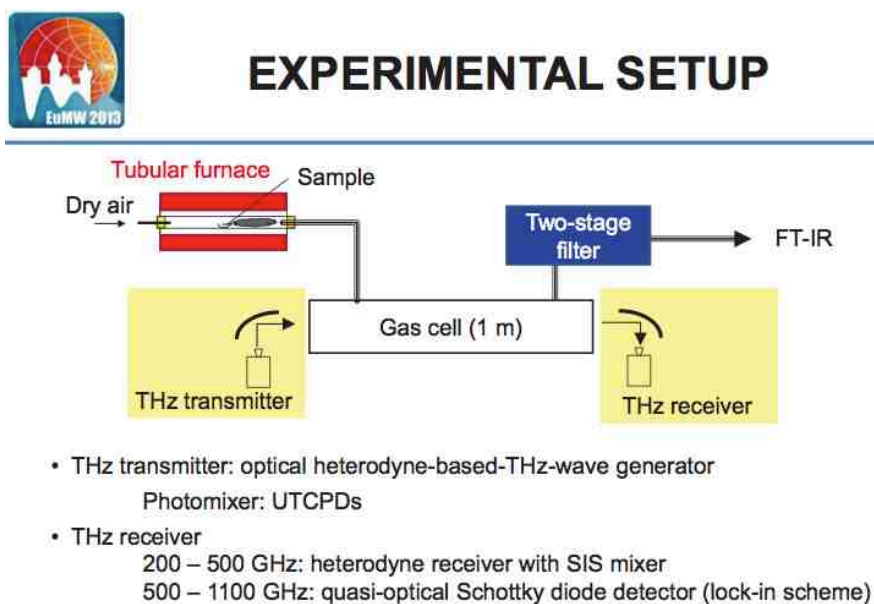
結論として、テラヘルツ技術は非侵襲の試験に適している。

次の段階として、超音波、X線、サーモグラフィ（温度計）といった従来方法の結果と比較したい。異なるレイヤーの組合せで、誤った警告音の割合を最小化したい。また、異なる周波数で帯域と解像度を増加させたい。

11. 「煙の中のテラヘルツセンシングとイメージング」：清水直文氏（NTTマイクロシステム）

煙の中で、テラヘルツを利用するセンシング技術を開発し、アクティブなテラヘルツ検出器を製作する。テラヘルツの長所は、複数のガスを検出し、サンプリングする必要がなく、遠隔から検出可能である。自然災害や火事での遠隔ガス検出、燃焼炉の排出物分析、火山のガスモニタリング等に利用できる。

### 図版



出典 欧州マイクロ波週間配布資料

様々な繊維を燃焼させて、実験を行った。ナイロン繊維が 500 度で煙となる。木炭が 400 度で、羊毛が 750 度で、ポリビニールが 350 度で煙となる。

遠隔ガス・センシングのシステムを開発している。

### 図版



## REMOTE GAS SENSING SYSTEM



- Operating frequency:  
200 – 500 GHz
- Sweep time:  
1 s/sweep
- Max Tx output:  
-2.7 dBm
- Rx noise:  
< -80 dBm
- Mobile
- Max. power consumption:  
5 kW

出典 欧州マイクロ波週間配布資料

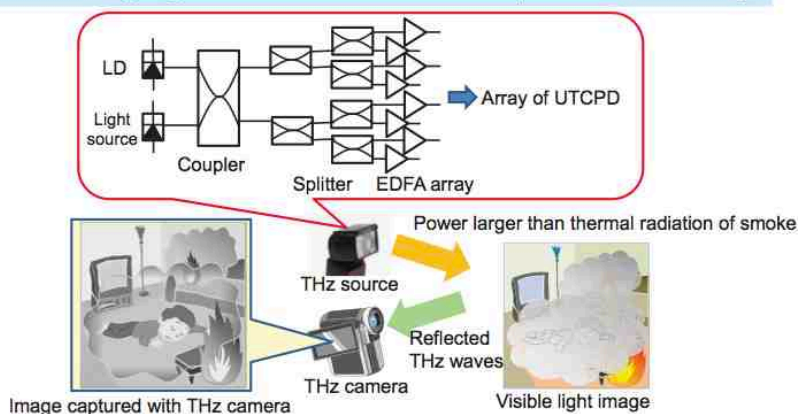
煙の中でのテラヘルツイメージングを開発している。パッシブは熱・温度放射を検出し、物体をイメージングできるが、アクティブはテラヘルツ波を検出し、物体をイメージングする。、煙の中で見えない物体からの放射が弱いので、アクティブ・イメージングの方が優れている。2014、2015年を睨んで開発している。

図版



## OUR PLAN

### Active imaging with THz radiation from photomixer array



出典 欧州マイクロ波週間配布資料

結論として、テラヘルツの波長はタバコ粒子より大きい。煙のセンシングは同時に発生している複数のガスを検出する。煙の中でのイメージングでは、テラヘルツ放射拡散の二次元イメージにより物体を発見できる。本研究では、NICTの寶迫氏等と協力した。

#### 12. 「生体内のファイバース THz イメージング」：チー・クアング・サン氏（国立台湾大学分子生医学映像研究センター）

テラヘルツ・ファイバは挑戦的である。ファイバの断面は、3 リング、1 リング、パイプ式がある。

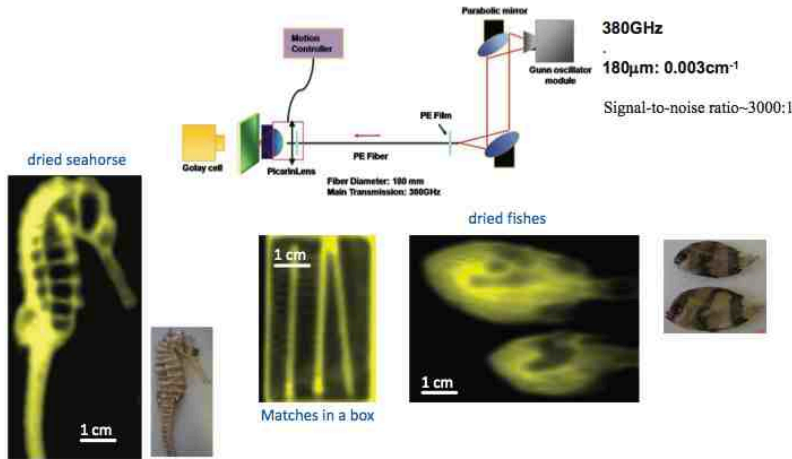
ファイバ・スキャンによるテラヘルツイメージング・システムを研究している。反射型がより実用的である。

図版



## Fiber-scanning THz Imaging Systems

J.-Y. Lu, et al, *Appl. Phys. Lett.* 92 084102-084105 (2008).



出典 欧州マイクロ波週間配布資料

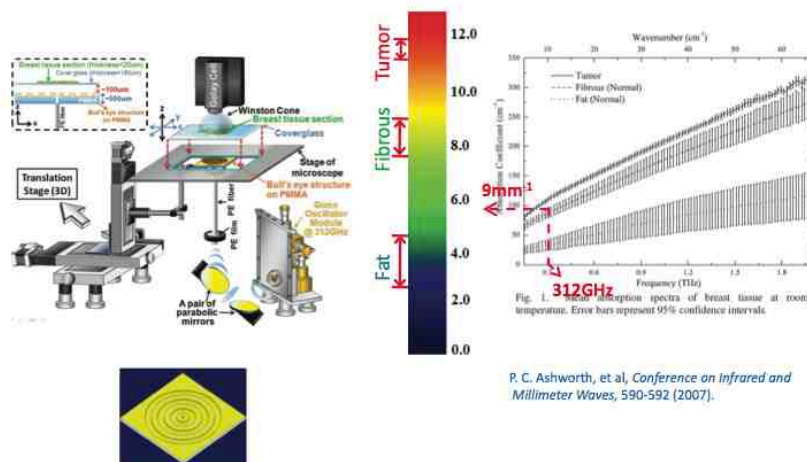
テラヘルツによるマンモグラフィーを研究している。乳がん検知に活用できる。テラヘルツによるファイバ・スキャン近接マイクロスコープを使用し、これまでの200倍精度が良くなった。

図版



## THz Fiber-Scanning Near-Field Microscopy

C.-M. Chiu et al, *Opt. Lett.* 34 1084-1086 (2009).

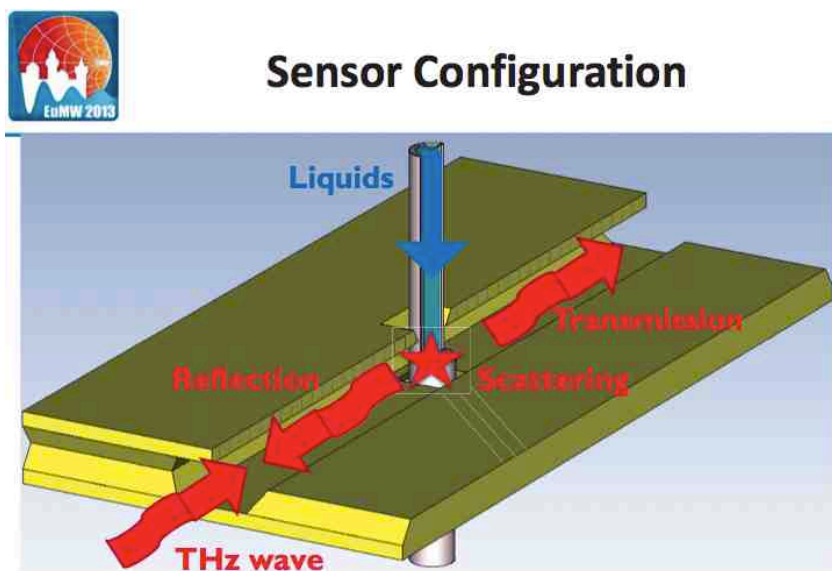


P. C. Ashworth, et al, *Conference on Infrared and Millimeter Waves*, 590-592 (2007).

13. 「サブテラヘルツ周波数でナノリットルの液体中に溶媒和され、10,000 以上のQ値を課される特徴を有する共振センサー構造を持った、固定化とラベルフリーな分子のセンシング」：ヨハン・ステイン氏（ベルギーETRO）

テラヘルツを利用するバイオセンシング技術を開発する。水分中のバイオセンシングを行う。既存の手法では問題があるので、テラヘルツセンサーの出番である。ラベルなし、流動化なし、リアルタイム、イオン化しない。課題は、水吸収率が良いことなど。

図版







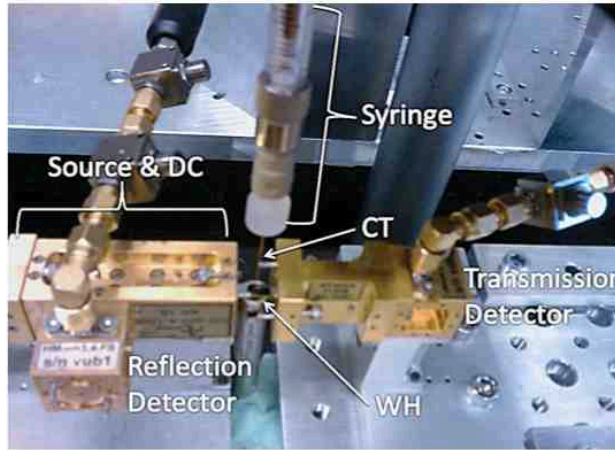
## Measurement Set-up

Measurement equipment:

AB Millimetre MVNA

Frequency range 226-336 [GHz] (WR-3.4)

Dynamic range: >80 [dB]



出典 欧州マイクロ波週間配布資料

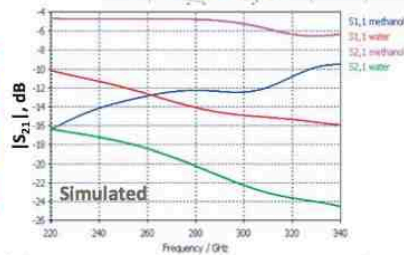
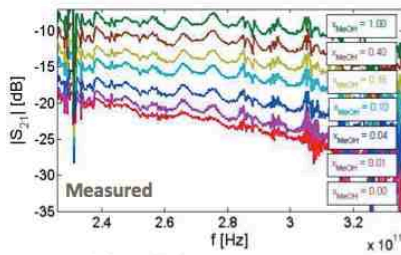
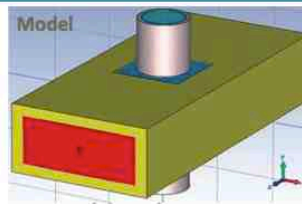
水とアルコールの混合水からアルコールを検出する実験を行った。ブロードバンドセンサーは 220-330GHz である。

図版



## Benchmarking: H<sub>2</sub>O-alcohol mixtures Broadband sensor (220-330 GHz)

- Sensor dimensions
  - WH  $a = 1012 \mu\text{m}$ ,  $b = 432 \mu\text{m}$  (WR3.4 equiv)
  - Opening  $465 \mu\text{m} \times 465 \mu\text{m}$  ( $d_{\text{eff}} = 15 \mu\text{m}$ )
  - Glass capillary tube  $r_1 = 180 \mu\text{m}$ ,  $r_2 = 217.5 \mu\text{m}$
- Performance @  $f = 220\text{--}330 \text{ GHz}$ 
  - $\Delta S_{21}$  (water-methanol) = 11–18 dB
  - Volume 40 nL



October 11, 2013

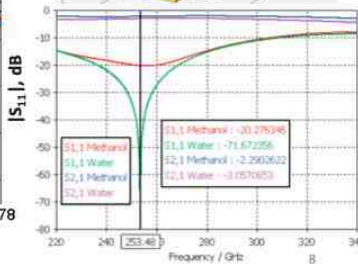
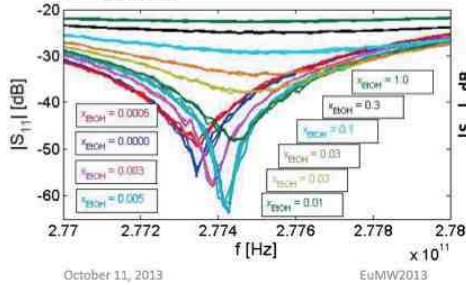
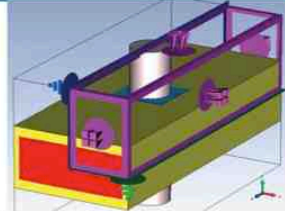
EuMW2013

7



## Benchmarking: H2O-alcohol mixtures Broadband sensor (220-330 GHz)

- Sensor dimensions
  - WH  $a = 1012 \mu\text{m}$ ,  $b = 432 \mu\text{m}$  (WR-3.4 equivalent)
  - Opening  $383.2 \mu\text{m} \times 383.2 \mu\text{m}$  ( $d_{\text{ci}} = 11.6 \mu\text{m}$ )
  - Glass capillary tube  $r_1 = 50 \mu\text{m}$ ,  $r_2 = 180 \mu\text{m}$
- Performance @  $f \approx 280 \text{ GHz}$ 
  - $Q_{3\text{dB}} > 9,000$
  - $\Delta S_{11}$  (water-ethanol) = 40 dB
  - Volume 4 nL



October 11, 2013

EuMW2013

出典 欧州マイクロ波週間配布資料

生物への応用としては、 $\lambda$  DNA 集中、リゾチーム (lysozyme) の不自然化、タンパク質配位子結合 (ligand • binding)、イースト細胞の物理現象の検出がある。

(質問) サンプルはどのくらいの分子を。

(回答) DNA なら、アボガド 10-23、130 DNA 分子。まだ改善の余地がある。

(質問) 水に加える分子を識別できるのか。

(回答) 異なる物を目標とすることができる。

(質問への回答) 水中で生きられるのはそんなに多くない。

(質問への回答) 水中のタンパク質は 40%。

### 【欧州マイクロ波週間 (EuMW2013) まとめセッション】

日時：2013年10月10日(木)午後4時～午後6時

場所：ニュルンベルグ会議センター(ドイツ・ニュルンベルグ)

参加者：NICT 欧州連携センター長 菱沼宏之ほか



(ローレンツ・ピーター・シュミット EuMW 会長、Wハインリッヒ (人材部長)、Tズ  
イック (組織委員会) 等陪席)

○E.R.ラインハルト (メディカルバレエEMN 社長) (1983～シーメンス)

人口増加・高齢化により、疾病が増加しているため、診断・治療のアプリ・ソリューションが必要となっている。長期的にヘルスケアの費用をどうするかという観点も必要であり、また、予防型・予測型・参加型・個人に合わせた医療が必要となっている。自分はニュルンベルグ地域で中小規模の医療をまとめるような業務をしている。

協力によるイノベーションをどうするかについては、共通の戦略と目標が必要である。戦略としては、予防・診断・治療・回復の過程で質と費用を見て行き、医療技術の最先端センターを作り、また、地域における医療サービスの最適化を図る。異分野・分野融合のチームで協働する力が必要である。また、複雑なものを簡単にするこゝである。異分野では複雑性があるものであり、衝突を管理調整する必要がある。知識の特徴として、関連性と接触可能性があり、知識移転の特徴として、識別と吸収がある。

当方では、色々な診断イメージングや、治療システム等を提供している。これにより、ドイツで 75 億ユーロの価格低下と品質維持を両立できるものである。医療技術評価は、研究→開発→市場化となるが、未来を見た医療技術評価が必要である。

世界で年間 105 万人が乳がんにかかっているが、これをどうケアしているか。コンピュータ・デモグラフィーで診断し、精度高く診断する。個人向け医療としては、個人向けの影響をコントロールできる投薬がある。バリアフリーな健康支援は、家庭でより長く独自に生きていけることを目標とする。センサー技術やテレメトリーを使用し、データセンター経由で、家族・知人・医療機関・救急等に送信され、革新的なサービスにつ

ながる。非侵襲の記録方法も有している。情報技術により医療を革新する。

○デックガナー・ベールナエール（欧州委員会 異分野・融合活動の DG 助言者）（半導体研究。1990～EU で FP。マイクロ・ナノ。ホライゾン 2020 に向けている活動している）

欧州 2020 は、賢く、持続可能で、包摂的な EU の成長戦略である。雇用・革新・投資・エネルギー・社会包摂のため。投資と GDP 成長率には相関関係がある。欧州は、成長・革新・融合を戦略としている。鍵となる要素技術（KET）は、ナノ・マイクロ・フォトなどがある。エコシステム・バリュー・イノベーションの連鎖が必要。欧州の工業機構、欧州投資銀行、ホライゾン 2020、地域のファンドが、鍵となる要素技術に係している。

ホライゾン 2020 は、2014～2020 年まで合計 770 億ユーロ（EU 予算の 8%）の規模だが、通常の研究開発ではなく、社会の挑戦に対応するものであり、証拠ベースでリスクを取る。中小企業を強調している。社会の挑戦に対応し、産業界を主導して競争力を強化する。2014～15 年に 6.4 億ユーロを ICT 分野に向けている。欧州研究評議会を作っている。高性能コンピュータ戦略、電子インフラ、デジタル科学等。産業界主導分野では 162.5 億ユーロのうち ICT は 74 億ユーロで、コンテンツ・ロボ・ナノ・フォト・5G などに投資予定。～46%がイノベーション主導の活動への助成。モノのインターネット等。ムーアの法則の逆を行ってナノの世界に行く。CMOS を超えて将来へ。鍵となる要素技術として、マイクロとナノに注力。「どこでも賢く」がコンセプト。共同技術イニシアティブに 50 億ユーロ、サイバーフィジカルをはじめとして、25 万人の雇用と 1000 億の投資を呼び込みたい。

11月6～8日にリトアニアで「ICT2013」を開催予定。

○授賞式：司会アンドレア・ステイザー、ローレンツ・ピーター・シュミット EuMW 会長他

- ・学生デザイン賞：台湾国立中正（chung cheng：蒋介石）大学：1.3～2.3GHz に調整可能なフィルター。
- ・学生デザイン賞：カナダ・カールトン大学：150GHz 電力組合せネットワーク。
- ・学生挑戦賞：ウィーン工科大学・モントリオール理工大学・伊パヴィア大学：インテリジェント・ホームケア（モニタリング）。
- ・若手エンジニア賞（1,028 提出、495 レビュー、7,422 レビューや、411 のプレゼン等を勝ち抜いた）：J カオ：25～45GHz の 45° の電力デバイダー。F.F.タフリ：追跡出力アンプ組合せシステムの効率性向上。
- ・EuMW マイクロ波賞：トパック、チョイ、コーヒ、齊藤他：170GHz シリコンベースのブロードバンド接続。

○次回のドイツ・マイクロ波会合の周知

2014年3月10日（月）～12日（水）に独 RWTH アーヘン工科大学で開催予定。

○今回の欧州マイクロ波週間（EuMW）のデータ

論文は、1,055 提出、495 人により 5,000 以上の（査読）審査、採択率 55%。

1,469 人が参加（EuMIC460 人、EuMW955 人、EuRAD424 人）。1,147 人がワークショップ参加。50～200 人が防衛等のフォーラムに参加。284 人が展示に参加。

○ロベルト・ソレンチーノ次年度議長

次回の欧州マイクロ波週間（EuMW）は、2014年10月5日～10日にローマで開催予定。

**【展示】**

○日系は、アンリツ、住友電工、三菱電機が大きなブースを出展し、存在感を示していた。

## **第五章 欧州におけるテラヘルツ帯の利用割当及びテラヘルツ技術の標準化動向**

最後に、欧州におけるテラヘルツ帯の利用割当、またテラヘルツ技術の標準化の動向について記す。

### **第一節 欧州における電波の定義とテラヘルツ帯の利用割当の現状**

まず、EUの電波の定義を確認する。2002年に制定されたEU法「周波数決定（通称：Radio Spectrum Decision）」<sup>89</sup>によれば、電波とは人工的な導きなしで宇宙に広がっている電磁波であり、9kHz～3000GHz（3THz）の周波数帯を含む。欧州では、日本と同じく、テラヘルツ帯とは100GHz～10THz帯のことを指すが多いので、100GHz～3000GHz（3THz）帯はEU周波数決定の適用範囲内となる。だが、275GHz～3000GHzは国際的に利用割当が決定していない<sup>90</sup>。

### **第二節 欧州におけるテラヘルツ帯の利用割当と標準化活動の動向**

現在、テラヘルツ帯の一部（275GHz以上）の利用割当は国際レベルでは決定されていない。だが、テラヘルツ技術は新しい無線技術として注目を浴び、研究開発は急速に進行しつつあり、近い将来、電波天文学等の受動的利用の他に、非破壊検査や超高速通信等の能動的利用によって世界中でテラヘルツ帯の利用が可能になり、その場合、国際レベルでの利用割当を決定することが必要になる。

<sup>89</sup> [http://europa.eu/legislation\\_summaries/information\\_society/radiofrequencies/124218a\\_en.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/information_society/radiofrequencies/124218a_en.htm)

<sup>90</sup> <http://www.erdocdb.dk/Docs/doc98/official/pdf/ERCREP025.PDF>

欧州において、テラヘルツ帯（100GHz～10THz）の統一的な標準化活動及び利用割当は準備段階にある。標準化活動に関しては、例えば、ドイツでは国家標準をPTBで策定中であるが、欧州電気通信標準化機構（ETSI）で、欧州で統一的な標準の策定はまだ行われていないようである。本報告書では、欧州の研究者にヒアリング調査を行い、テラヘルツの標準化活動に関する質問を投げかけたが、「知らない」、もしくは「欧州で統一的な動きはない」と答える研究者ばかりであり、有効な回答は得られていない。利用割当に関しては、欧州郵便・電気通信主管庁会議（CEPT）の欧州通信庁（ECO<sup>91</sup>）のECO周波数情報システム（EFIS）<sup>92</sup>の責任者であるトマス・ウェーバー氏に、メールにより書面で質問事項に回答していただいた。それによれば、現在、国際電気通信連合の電波部門（ITU-R）のWP 1A（Working Party 1A）は、275GHz – 1000GHz範囲で働く能動業務の技術・運用の諸特性について検討しており、新しいITU-R SM報告書「THzトレンド」（「275GHz以上の周波数帯の能動業務に関する技術トレンド」）の予備草稿とに向けた作業資料と275 – 1000GHz範囲で作動する能動業務の技術・運用の諸特性に関する新研究課題案（Questions）草稿への寄与について検討し、新課題案の草稿を準備している。

以下に、回答の抄訳を記す。

#### 欧州郵便・電気通信主管庁会議（CEPT）・欧州通信庁（ECO）への調査

回答日：2013年11月8日

---

<sup>91</sup> <http://www.cept.org/eco/>

<sup>92</sup> <http://www.efis.dk>

## 質問と回答の概要

1) 2012年1-2月に開催されたITU-Rの世界電波通信会議(WRC)では、275GHz-3000GHzの周波数利用割当について、どのような改訂があったか。

回答：

WRC-12(2012年度世界電波通信会議)では、国際周波数分配の脚注5.565が改訂された。受動業務の利用は、3000GHz帯まで拡大された。そして、275-3000GHz範囲の受動業務による利用は、能動業務による利用を妨げてはいけない、また、能動業務により275-1000GHz範囲の利用を望む主管庁は、有害な混信から受動業務を保護するため、実行可能なあらゆる措置を取ることを要請される、と改訂された。

2) ITUでは、275-3000GHz帯の利用に関して、現在どのような活動を行っているか。

回答：

現在、ITU-RのWP1A(Working Party 1A)は、275GHz-1000GHz範囲で働く能動業務の技術・運用の諸特性について検討しており、新しいITU-R SM報告書「THzトレンド」(「275GHz以上の周波数帯の能動業務に関する技術トレンド」)の予備草稿に向けた作業資料を準備した。同じく、WP1Aは、SG1(ITU-RのStudy Group 1)でさらに検討されるように、275-1000GHz範囲で作動する能動業務の技術・運用の諸特性に関する新研究課題案(Questions)草稿への寄与について検討し、新課題案の草稿を準備した(日本から寄与を受けていた)。

3) 3000Ghz-10THz範囲の周波数帯の利用割当について、WRC-12で議論されたか。

回答：議論されなかった。

4) 将来的に、3000Ghz-10THz範囲の割当は、どの国際機関で議論されることになるだろうか。

回答：ITU-RのWP1A(Working Party 1A)である。

なお、これらの周波数帯は、各国の電気通信法の影響下にあるので、国の省庁が責任を持つ。ITU-R の国際プロセスは国際保護の問題のために適用されることにお気づきいただきたい。これは機械装置の安全性等の問題とは非常に異なる。例えば、赤外線無線アプリケーションに関しては、危険を回避するために、国の所管庁が被曝の安全性を考慮し、放出量を限定して、一般使用許可を出している。同様に、幾つかの通常の電波アプリケーションは赤外線部品を利用している（例：自動車の通行料金を徴収する機関は赤外線の無線機器を利用している）。他の顕著な赤外線アプリケーションは、最近交通部門で見られ、遠隔操作や侵入防止の目的を持つ。

CEPT の活動は基本的に要求に応じて (on demande) 行われるが、現在までのところ、これらの極端に高い周波数帯の調査の実施要求は市場のステークホルダーから受けていない。最近の調査は、だいたい 100 – 150GHz 帯までの周波数範囲に関わる。

### 第三節 欧州におけるテラヘルツ波の生体への影響に対する法的規制と研究

光と電波の間に位置する電磁波の一種であるテラヘルツ波は、電磁波である限りにおいて、生体に影響を与える可能性がある。欧州では、0Hz～300GHzまでを対象に電磁場や電磁波の被曝から労働者を保護するために、2004 年にEU指令が制定されている<sup>93</sup>。また、人為的な光放射（紫外線、可視光線、赤外線）の影響から労働者を保護するEU指令も制定されている<sup>94</sup>。

また、欧州では「THzブリッジ (THz-Bridge)」<sup>95</sup>という研究プロジェクトが、2001年2月～2004年1月（36ヶ月）にかけて実施された。このプロジェクトでは、テラヘ

---

<sup>93</sup>

[http://europa.eu/legislation\\_summaries/public\\_health/health\\_determinants\\_environment/c11150\\_en.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/public_health/health_determinants_environment/c11150_en.htm)

<sup>94</sup>

[http://europa.eu/legislation\\_summaries/employment\\_and\\_social\\_policy/health\\_hygiene\\_safety\\_at\\_work/c11151\\_en.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/employment_and_social_policy/health_hygiene_safety_at_work/c11151_en.htm)

<sup>95</sup> <http://www.frascati.enea.it/THz-BRIDGE/>

ヘルツ波を利用した生体システムの研究を実施するとともに、医療イメージングへの応用を考えて、テラヘルツ波の生体への被爆影響についての研究も行っている。研究コンソーシアムの参加組織は、ENEA（伊）、ヘルムホルツ・ドレスデン・ロッセンドルフ研究センター（独）、テルアビヴ大学（イスラエル）、ステュットガルト大学（独）、ゲーテ大学（独）、ジェノバ大学（伊）、ギリシャ国立研究基金（ギリシャ）、テラビュー社（英）、ノッティンガム大学（英）、アルバート・ルートビク大学（独）である。

## まとめ

以上、欧州におけるテラヘルツ技術の研究開発動向について概観した。全体の要約に関しては、本報告書の冒頭に収録したので、そちらを参考にしていきたい。現在、欧州において同技術に対する関心は高まりつつあり、様々な動きがある。今後も、欧州の動向を注視していく必要がある。同報告書が日本の研究開発機関の研究開発指針の参考になれば幸いである。