

低コスト・小型テラヘルツレーダイメージングシステム

大阪大学 大学院基礎工学研究科
助教 易利

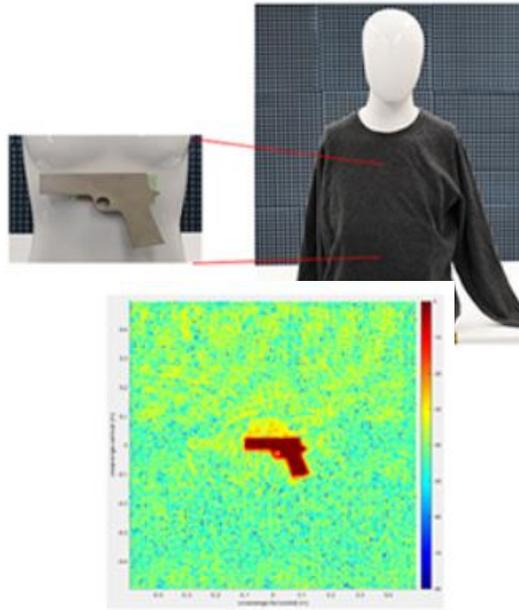
2024年1月30日

電磁波によるイメージング技術



光を用いた写真 (カメラ)

- 高分解能 ($\sim \mu\text{m}$)
- × 透過が困難



<https://www.global.toshiba.jp/technology/corporate/rdc/rd/topics/19/1909-02.html>

マイクロ波を用いた セキュリティ応用(東芝)

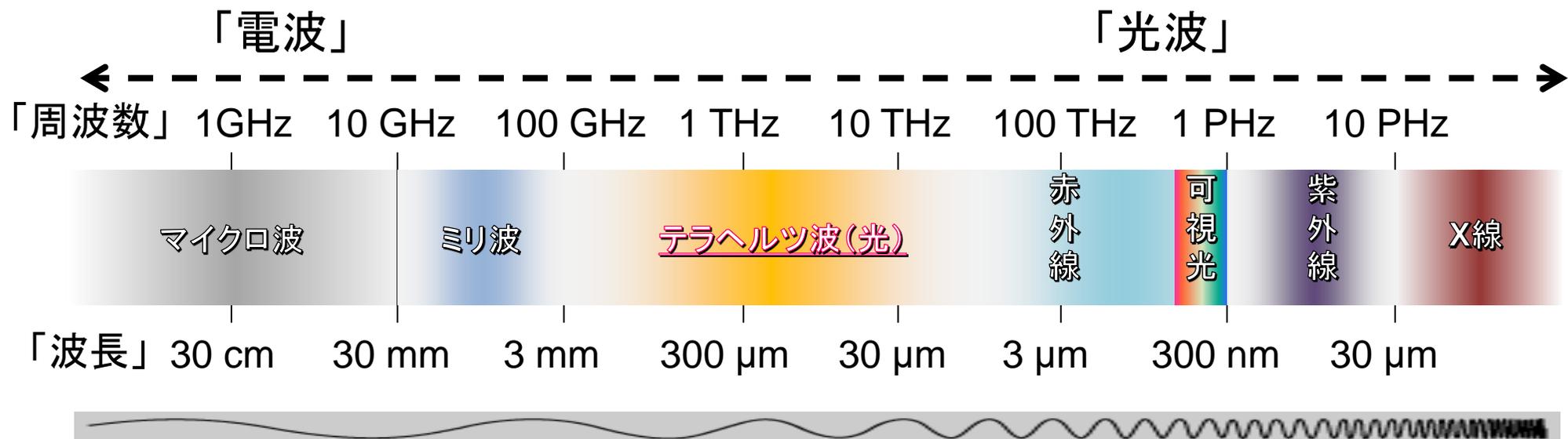
- 多くの材料(除金属)を透過
- 被ばく無
- × 分解能が制限($\sim \text{cm}$)



X線を用いた医療応用 (レントゲン写真)

- 高分解能 ($< \mu\text{m}$)
- 材料を透過
- × 取扱いが困難
(被ばく有)

電磁波の呼称と波長の関係



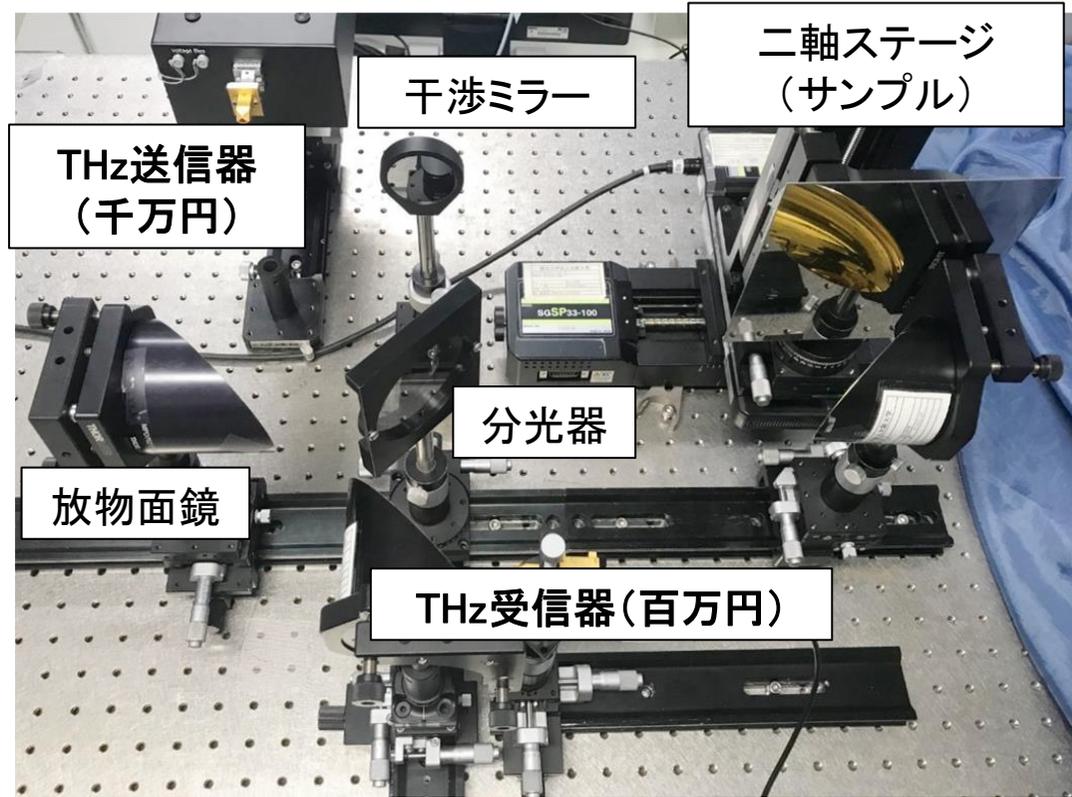
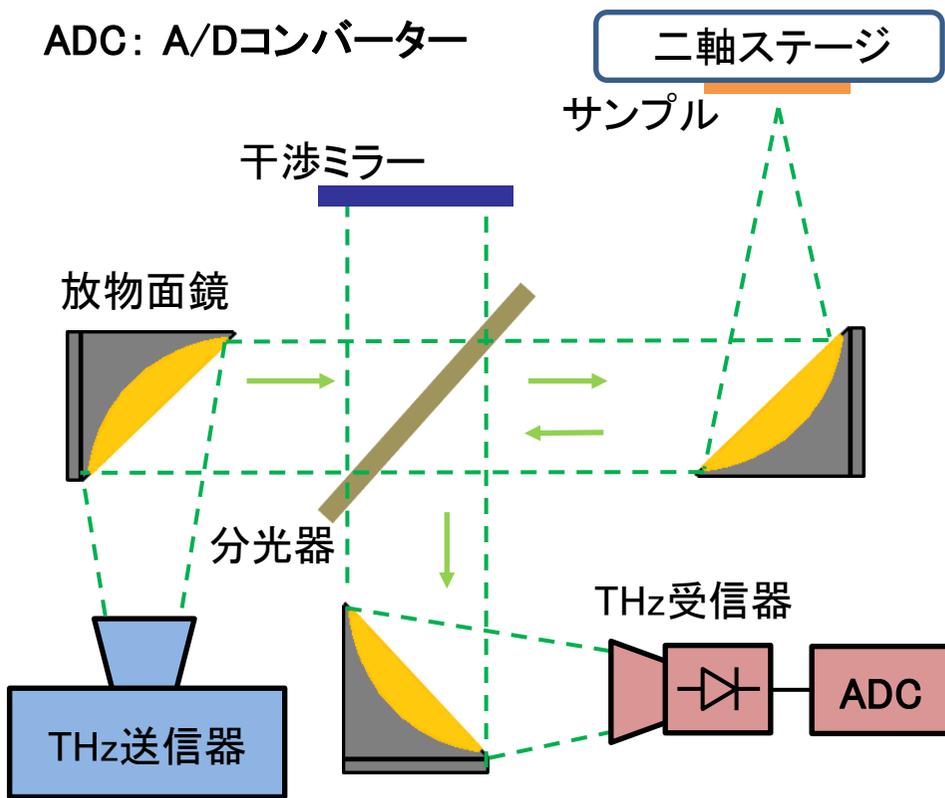
波長が長いほど,

物質の透過性が高い. 遠くへ伝達できる.

波長が短いほど,

デバイスの小型化が可能. 分解能を高くできる.

テラヘルツ波 (THz) イメージング



実験室で使用するTHz波イメージングシステム

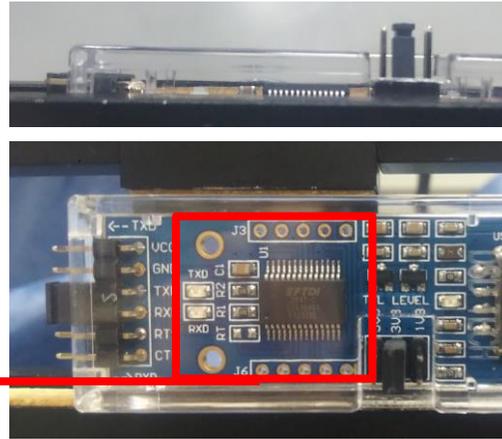
○mm級の分解能

○被ばく無

○多くの材料を透過

×イメージングシステムが高価で大型

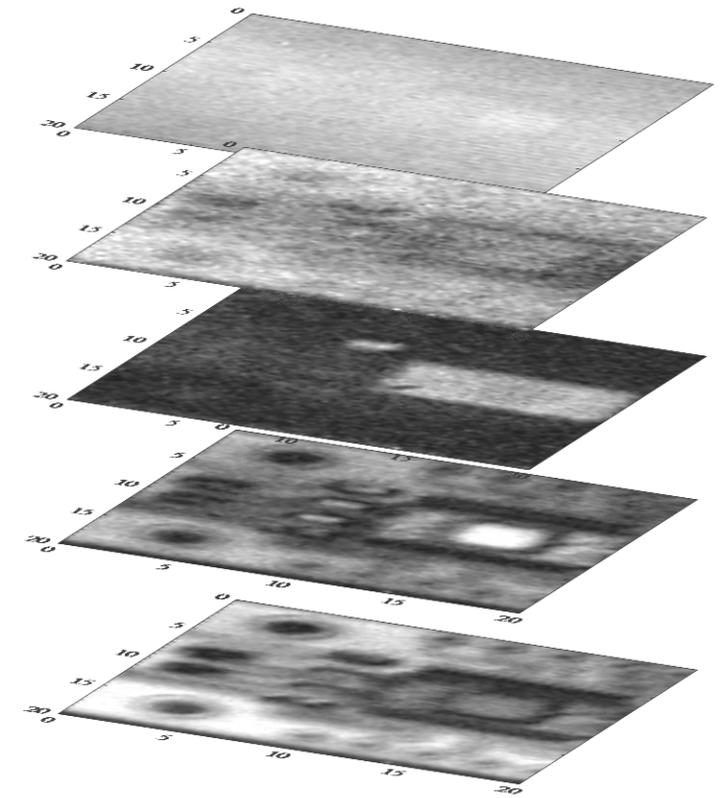
THz波三次元イメージング



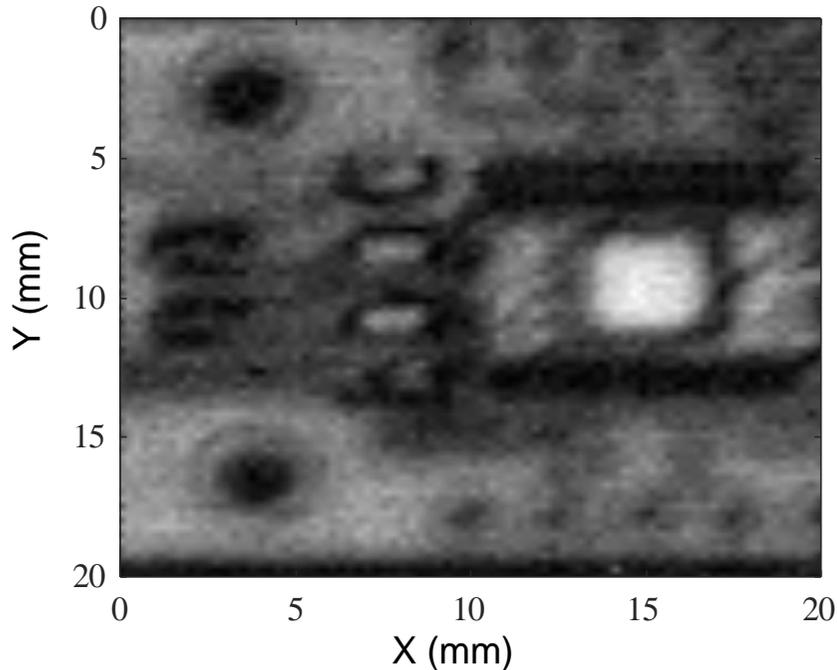
側面図

平面図

測定サンプル

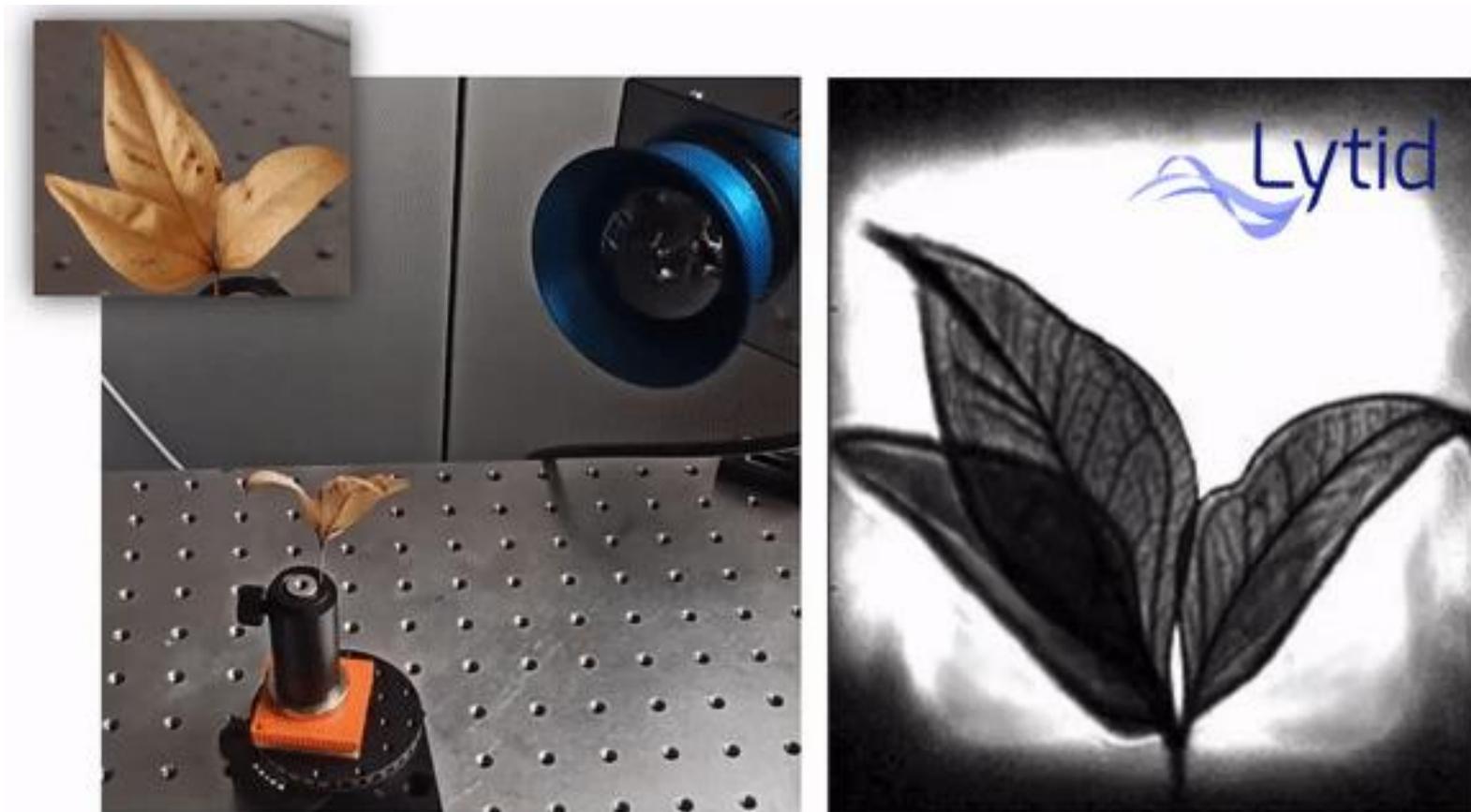


三次元イメージング結果：
透過性を活かすTHz断層撮影



THz波(300-GHz)イメージング結果

THz波応用の可能性



<https://lytid.com/imaging-system/>

商用システム(仏Lytid社)の例

○mm級の分解能

○被ばく無

○多くの材料を透過

×イメージングシステムが高価で大型

THz波応用の可能性

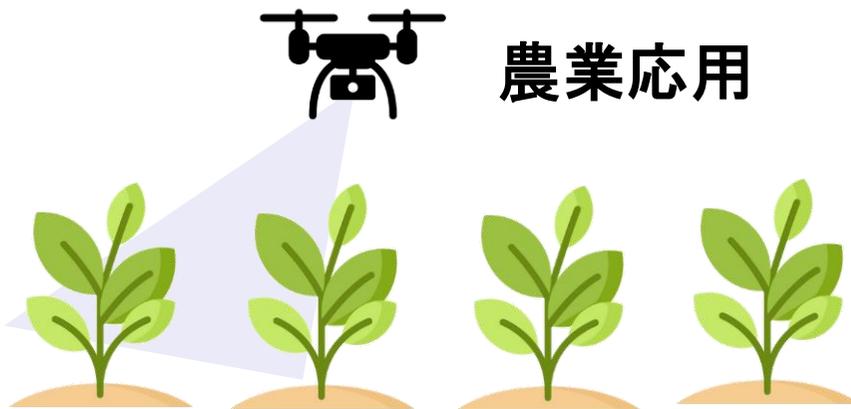
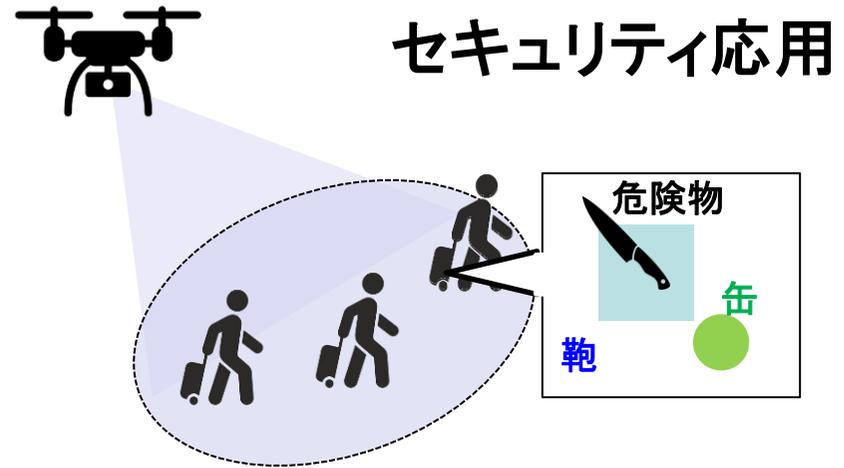
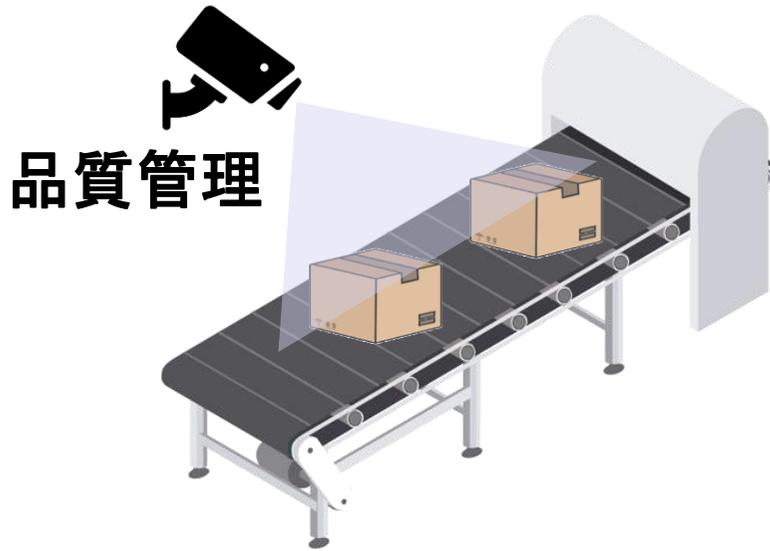


image: Flaticon.com

Society 5.0で様々な分野で、**次世代のセンシングデバイス**として活躍の可能性がある

従来技術とその問題点

✓ THz帯の**単体素子**だけでも高い！

高周波の送信器、受信器、導波路、コネクタ等々も高価

✓ システムの構成が高価かつ複雑のため、
現状**大型**のシステムしかない

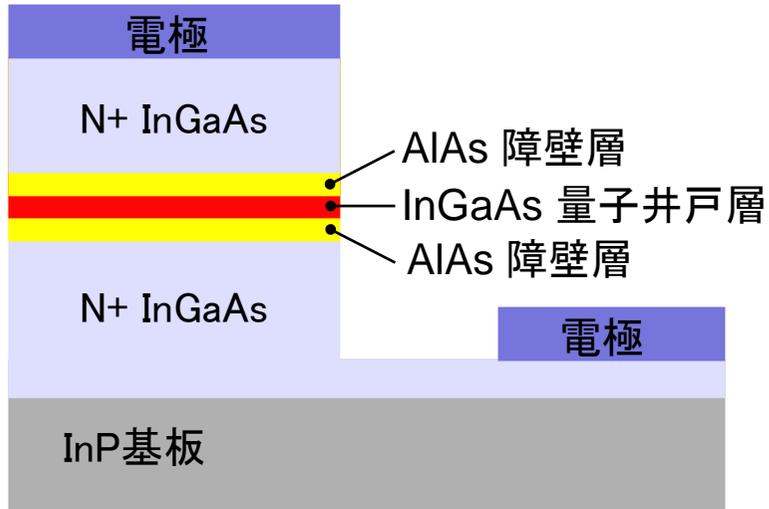
✓ 三次元イメージング用のシステムが更に複雑になる

✓ CMOSなどの集積技術、アレイ化はまだ研究の初期段階であり、
システム全体の小型化ができない

実用化のためには、新しいコンセプトを導入する必要がある

共鳴トンネルダイオード (RTD)

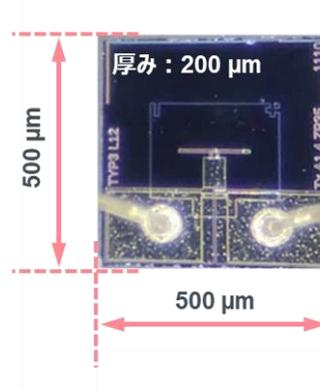
量子薄膜構造を有する電子デバイス



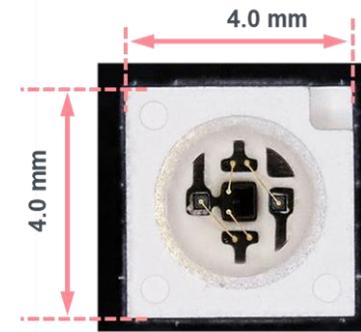
層構造の例



使用するRTD素子



チップ外観



パッケージ外観

(ローム株式会社様よりご提供)

特徴

1. 小型
2. 基本波によるテラヘルツ発振
3. 高感度テラヘルツ波検出
4. 低消費電力
5. 室温動作



*PLCC package
under development

- ✓ 単体の電子デバイスとして, 最も高い周波数(1.98 THz)で発振動作可能
- ✓ 高感度のTHz検波器としても動作可能

共鳴トンネルダイオード(RTD)



令和元年12月2日
大阪大学
科学技術振興機構(JST)

未開の電磁波テラヘルツ波の検出感度を1万倍に向上

～5Gのその先へ、超高速無線通信の実用化を切り拓く新技術～



ポイント

- テラヘルツ波を検出可能な小型電子デバイスである共鳴トンネルダイオードのテラヘルツ波検出感度を同期検波によって、1万倍向上。
- テラヘルツ波は、超高速無線通信、高分解能センシングなどの応用が期待されているが、その発生、検出技術が未熟であるという課題があった。
- 共鳴トンネルダイオードを用いた世界最高速のテラヘルツ無線通信実験に成功。
- 次世代無線通信、分光分析、非破壊検査、セキュリティカメラ、高分解能レーダーなどへの応用が期待。

大阪大学 大学院基礎工学研究科の富士田 誠之 准教授、永妻 忠夫 教授、西田 陽亮(当時 博士前期課程学生)、西上 直毅(博士前期課程学生)、Sebastian Diebold 博士(当時 特任助教)らは、ローム株式会社と共同でテラヘルツ波^{注1)}の検出が可能な小型電子デバイスである共鳴トンネルダイオード(Resonant Tunnelin Diode:RTD)^{注2)}のテラヘルツ波の検出感度を1万倍という大幅な向上を実現しました(図1、2)。

電波と光の中間領域の周波数を有する電磁波であるテラヘルツ波は、超高速無線通信、高分解能センシングなどの応用が期待されています。しかしながら、その発生、検出技術が未熟であるという課題があり、各種応用を切り拓くためには検出感度の大幅な向上が必要です。

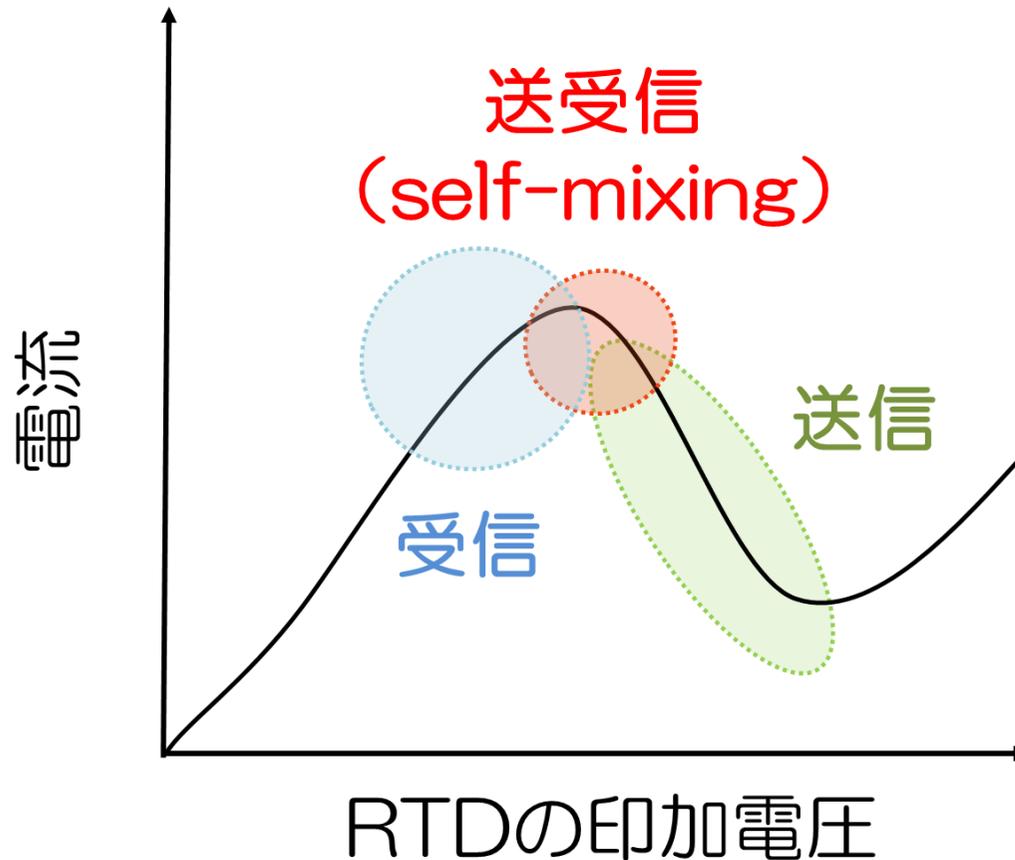
本研究グループは、テラヘルツ帯で動作可能な電子デバイスである共鳴トンネルダイオードに着目しました。共鳴トンネルダイオードを発振器として動作させ、検出対象のテラヘルツ波と同期させることでテラヘルツ波の検出感度を1万倍向上させることに成功し、併せて、30ギガビット毎秒の世界最高速無線通信を実現しました。

これにより、テラヘルツ波を活用した超高速無線通信や分光分析、非破壊検査、計測、セキュリティ応用、高分解能レーダーなどの実用化に向けた動きが加速することが期待されます。

本研究成果は、英科学誌「Scientific Reports」に2019年12月2日(日本時間)にオンライン掲載される予定です。

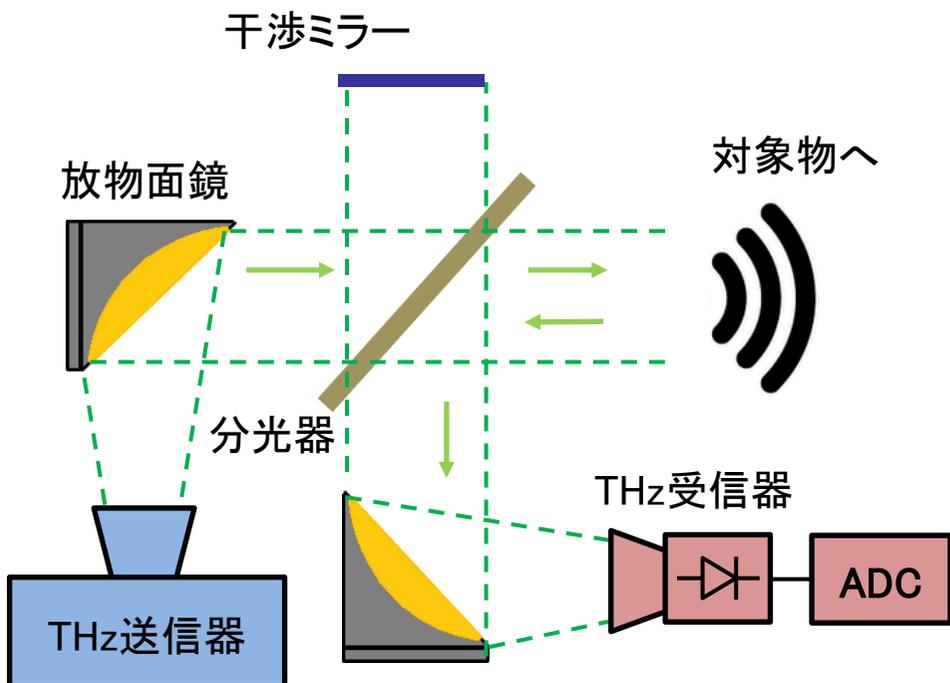
本研究は、科学技術振興機構(JST) 戦略的創造研究推進事業 チーム型研究(CREST)「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクス創成」研究領域における研究課題「共鳴トンネルダイオードとフォトリソグラフィによるテラヘルツ集積基盤技術の創成」(研究代表者:富士田 誠之)の一環として行われました。

RTD独自の送受信動作

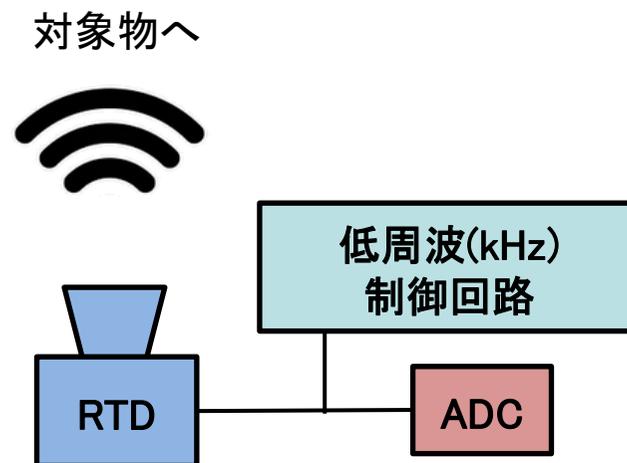
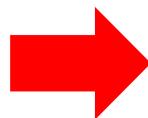


- ✓ 印加電圧の選択によって、デバイス1台のみで送受信動作可能
 - ✓ RTDのself-mixing動作で**干渉信号**が簡単に取れる

RTD単体を用いた THzイメージングシステム



従来のシステム構成例



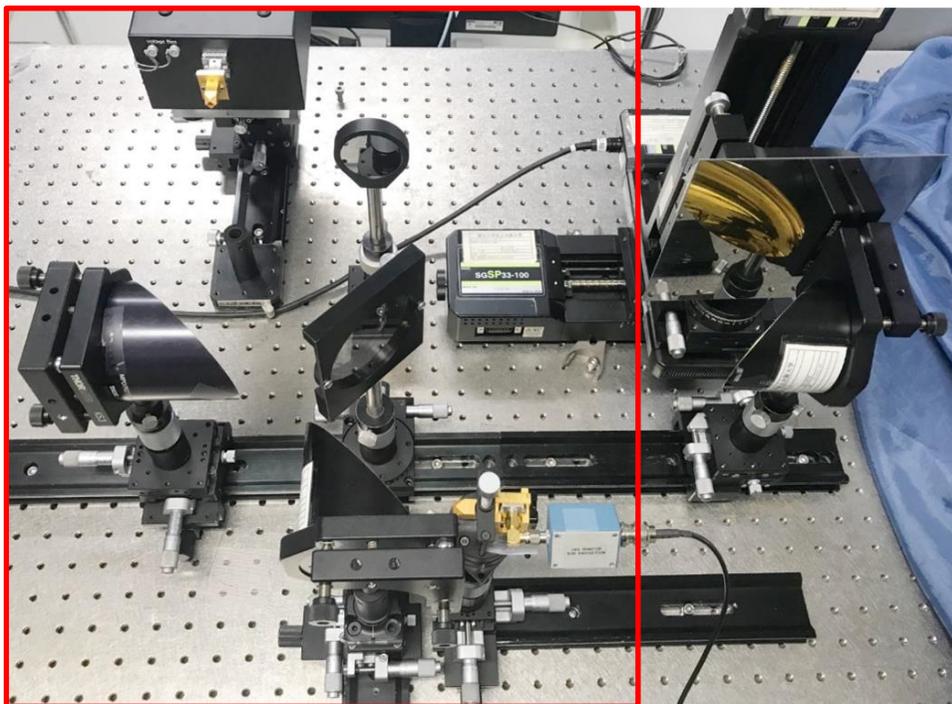
ADC: A/Dコンバーター

RTD単体を用いたシステム

- ✓ 高価なTHz波信号源、受信器、分光器などが1個のRTDで代用できる
 - ✓ kHz帯のADC、低周波回路のみで制御できる
- ✓ 小型かつ低価のため、アレイ化が容易に可能になる

RTD単体を用いた THzイメージングシステム

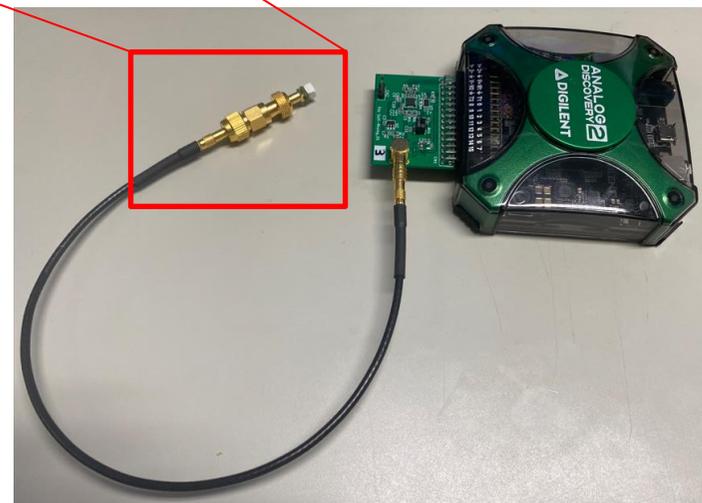
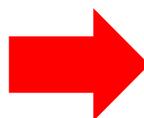
全部RTDで代用される



従来のシステム構成例

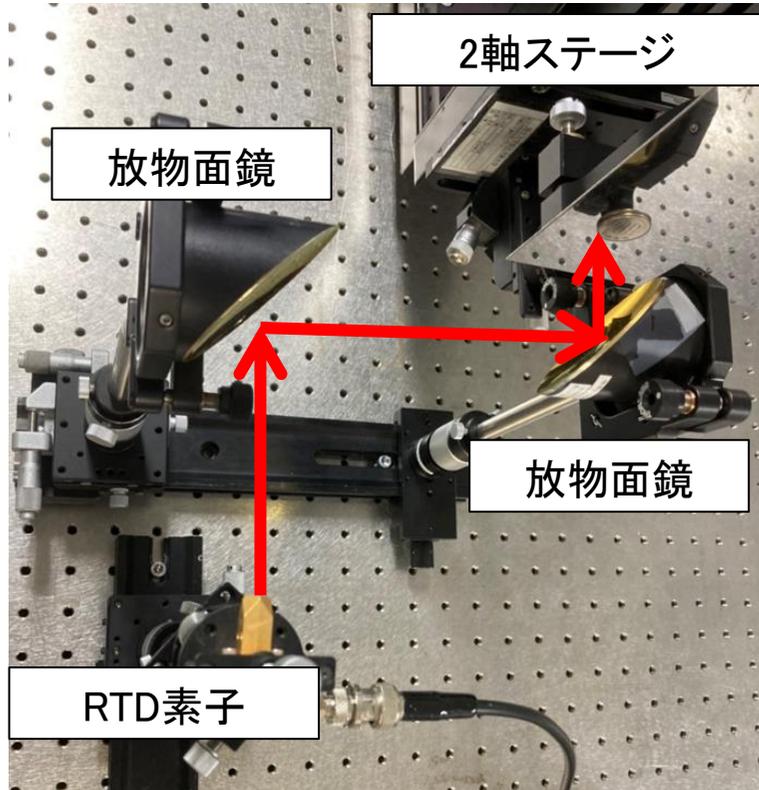


封筒の中の100玉

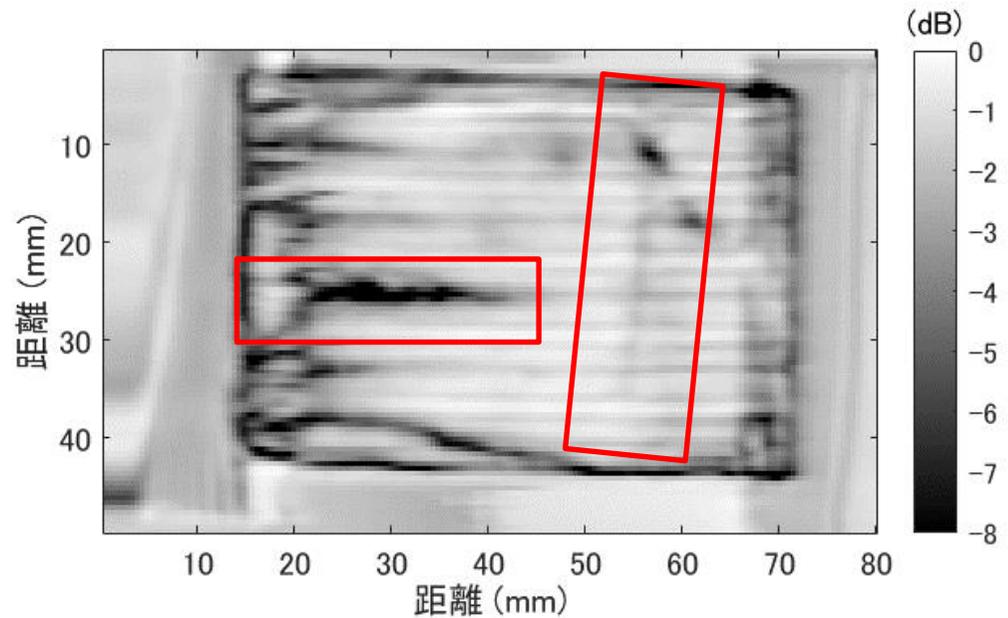
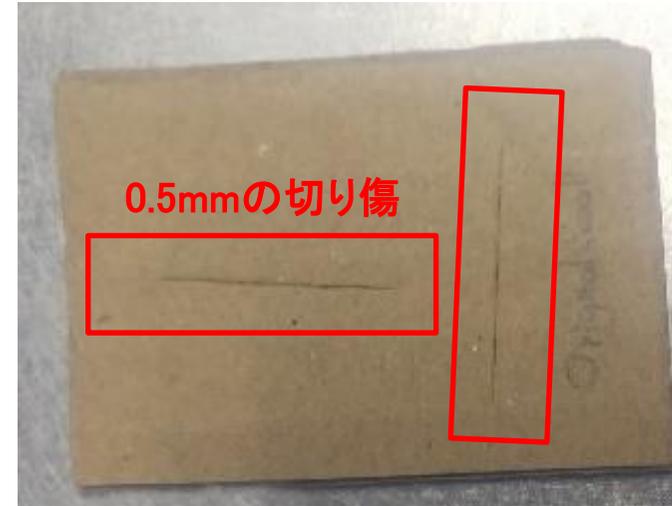


RTD単体だけのイメージング
システム(プロトタイプ)

RTDイメージングの応用例その1

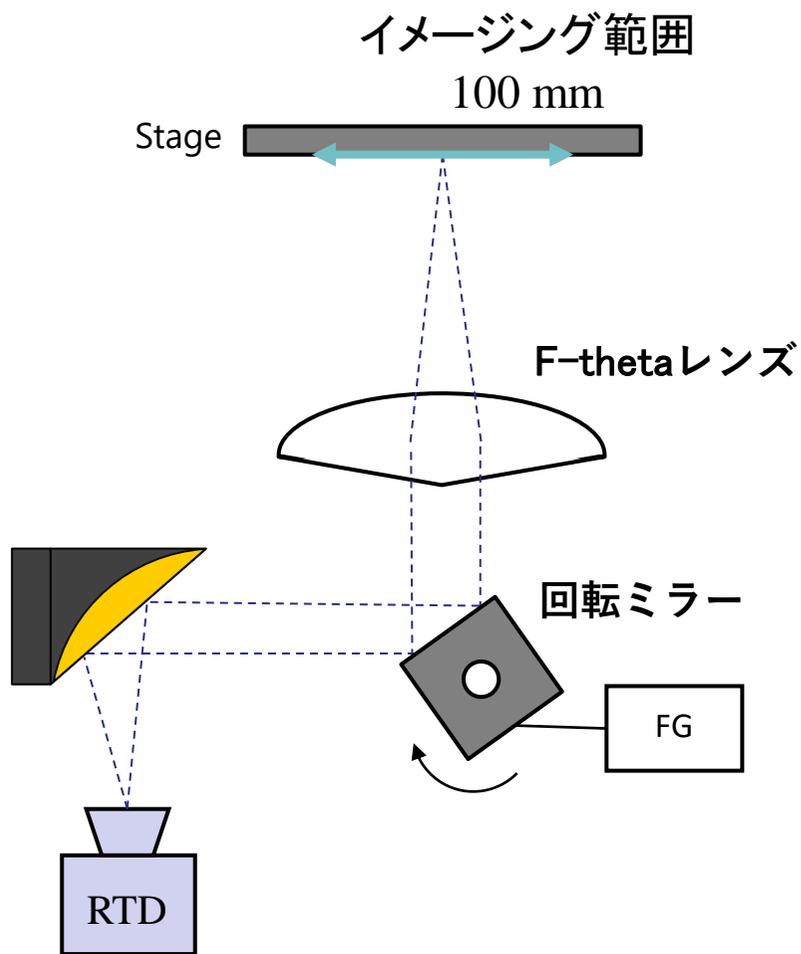


RTD単体のみのイメージングシステム

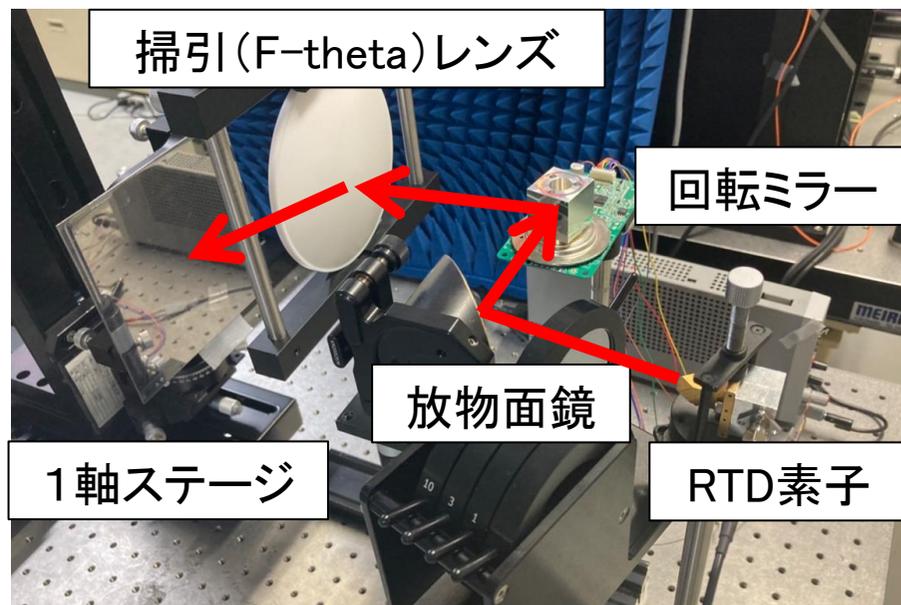


- ✓ RTDイメージングシステムで段ボールの傷を可視化

RTDイメージングの応用例その2



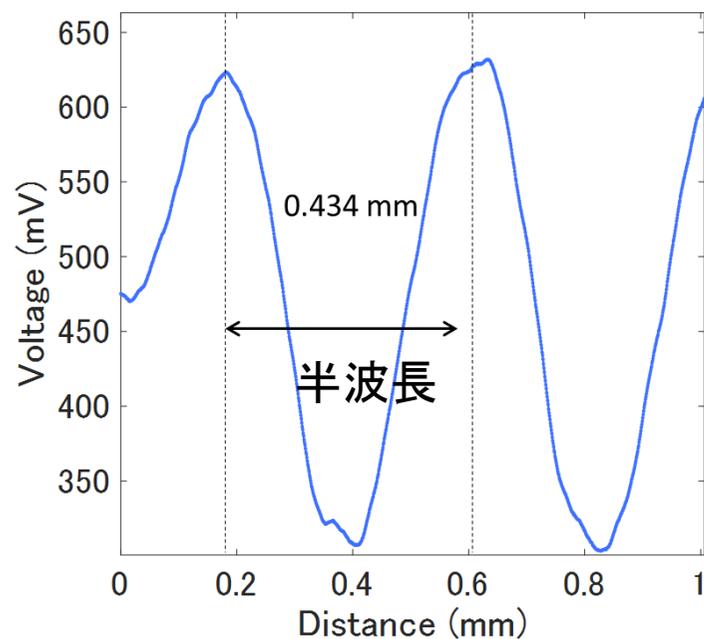
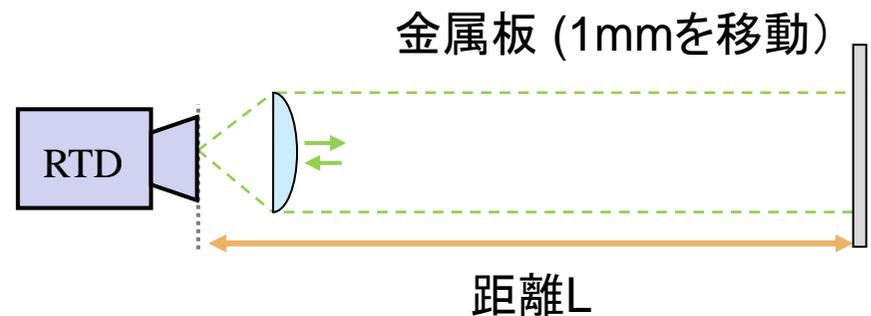
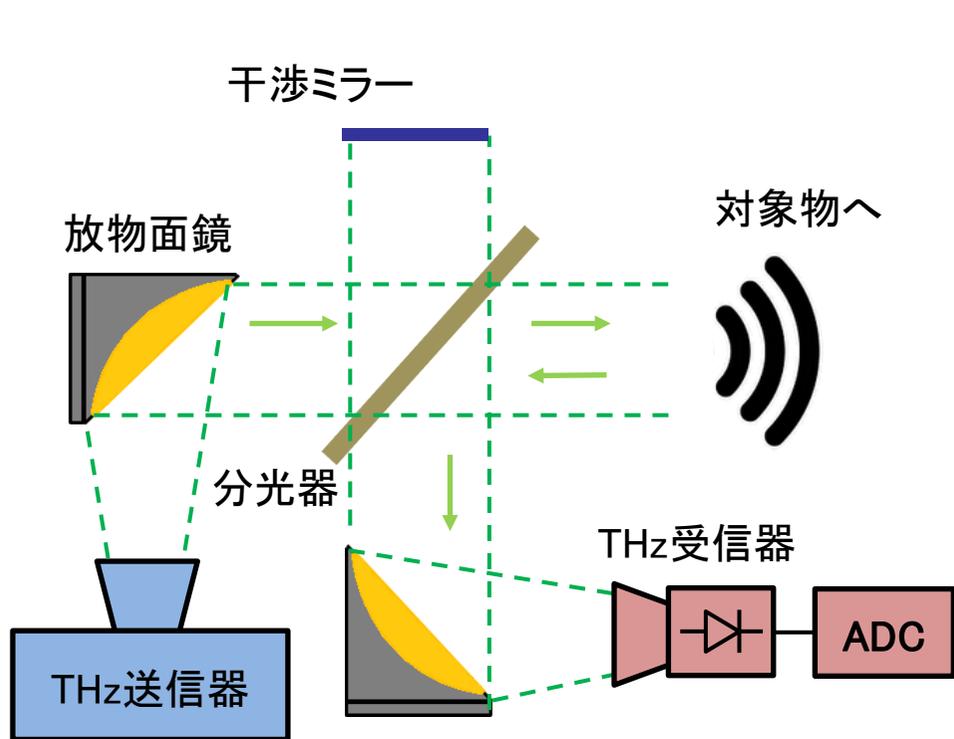
ビーム走査+1軸ステージによる
高速イメージングシステム



	2軸ステージ	ビーム走査方式
空間分解能	0.794 mm	~1.6 mm
イメージング時間 (100 × 200 mm ²)	808 s	4 s

✓ RTDイメージングシステムの高速度化

RTD単体を用いた THzレーダーダイメージングシステム



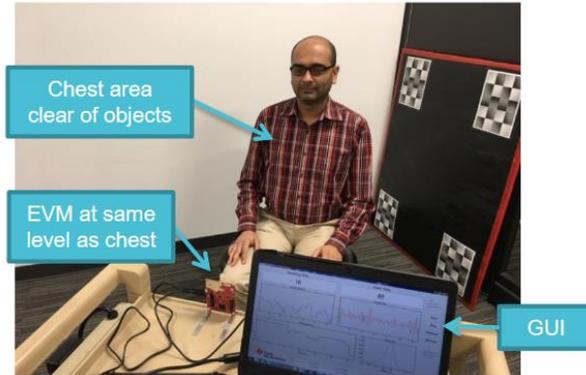
従来のシステム構成例

- ✓ 干渉信号で振動・距離が測れる
- ✓ 単体RTDも同じ動作ができる

$$V_{\text{RTD}} \propto \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{345 \text{ GHz}} \approx 0.869 \text{ mm}$$

RTDレーダの応用例その1



Note: Although not an absolute requirement, a lens in front of the sensor will improve the performance



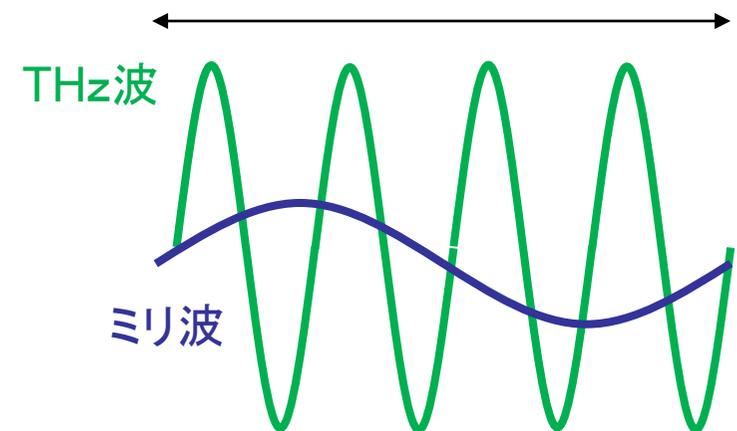
製品化されたミリ波(24GHz)生体レーダシステム(Texas instrument)

<https://www.ti.com/ja-jp/video/5428037798001>

THz (RTD) を導入する意味？

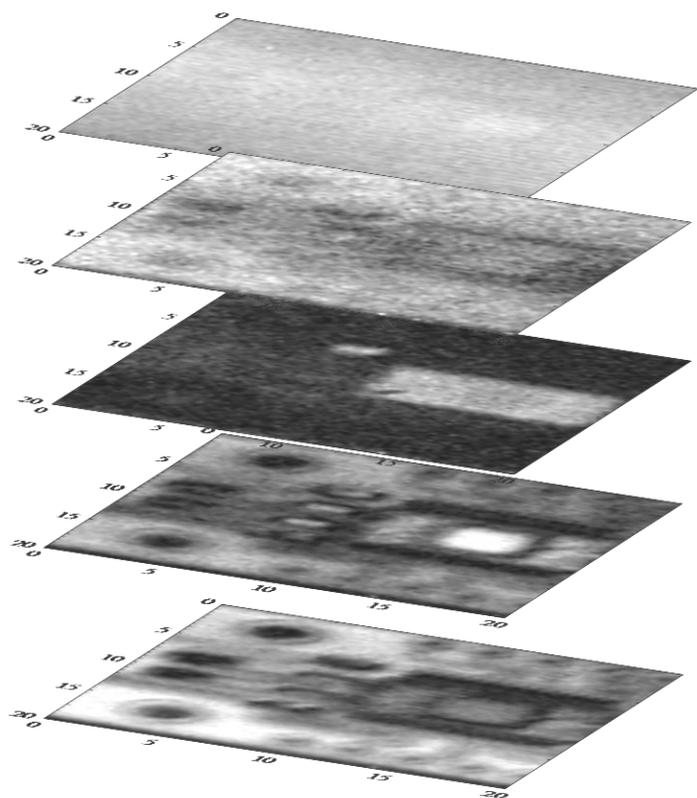
- ✓ 短い波長でより微小な信号を取れる
- ✓ ミリ波技術より優れた角度分解能
- ✓ システムをより小型化

2mmの振動に対するレーダ信号

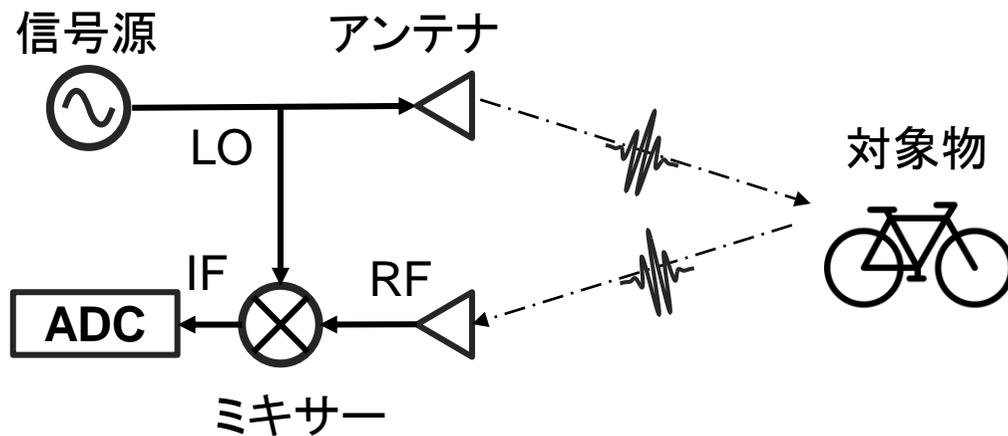


微動の干渉信号と波長の関係

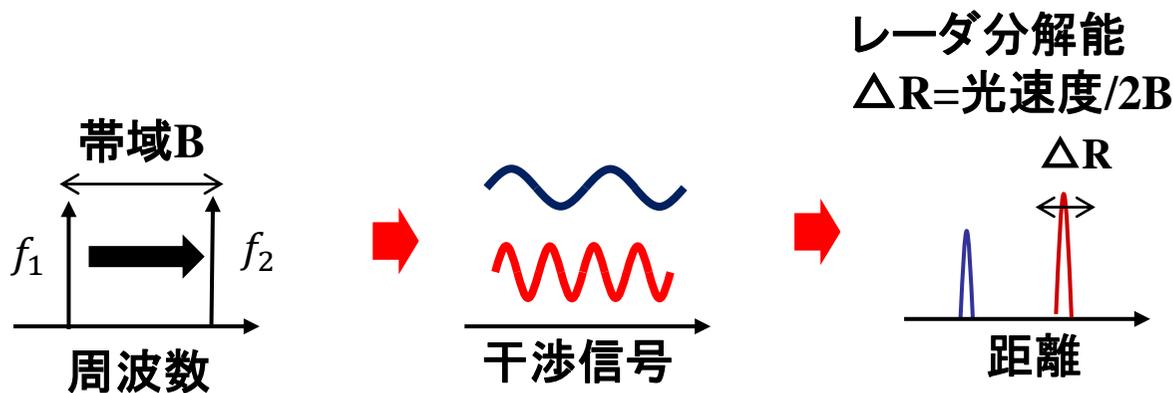
RTD単体を用いた THzレーダイメージングシステム



三次元レーダイメージング結果：
透過性を活かすTHz断層撮影

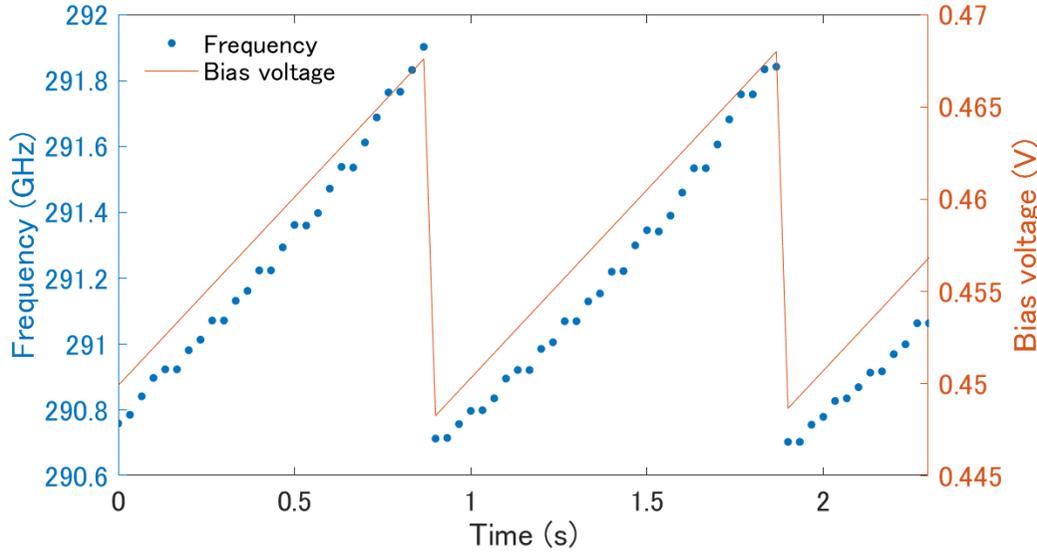


一般的なFMCWレーダシステム



THz帯の帯域(周波数掃引)と信号の干渉が必要
➡ システム製品が千万円単位になる

RTD単体を用いた THzレーダイメージングシステム

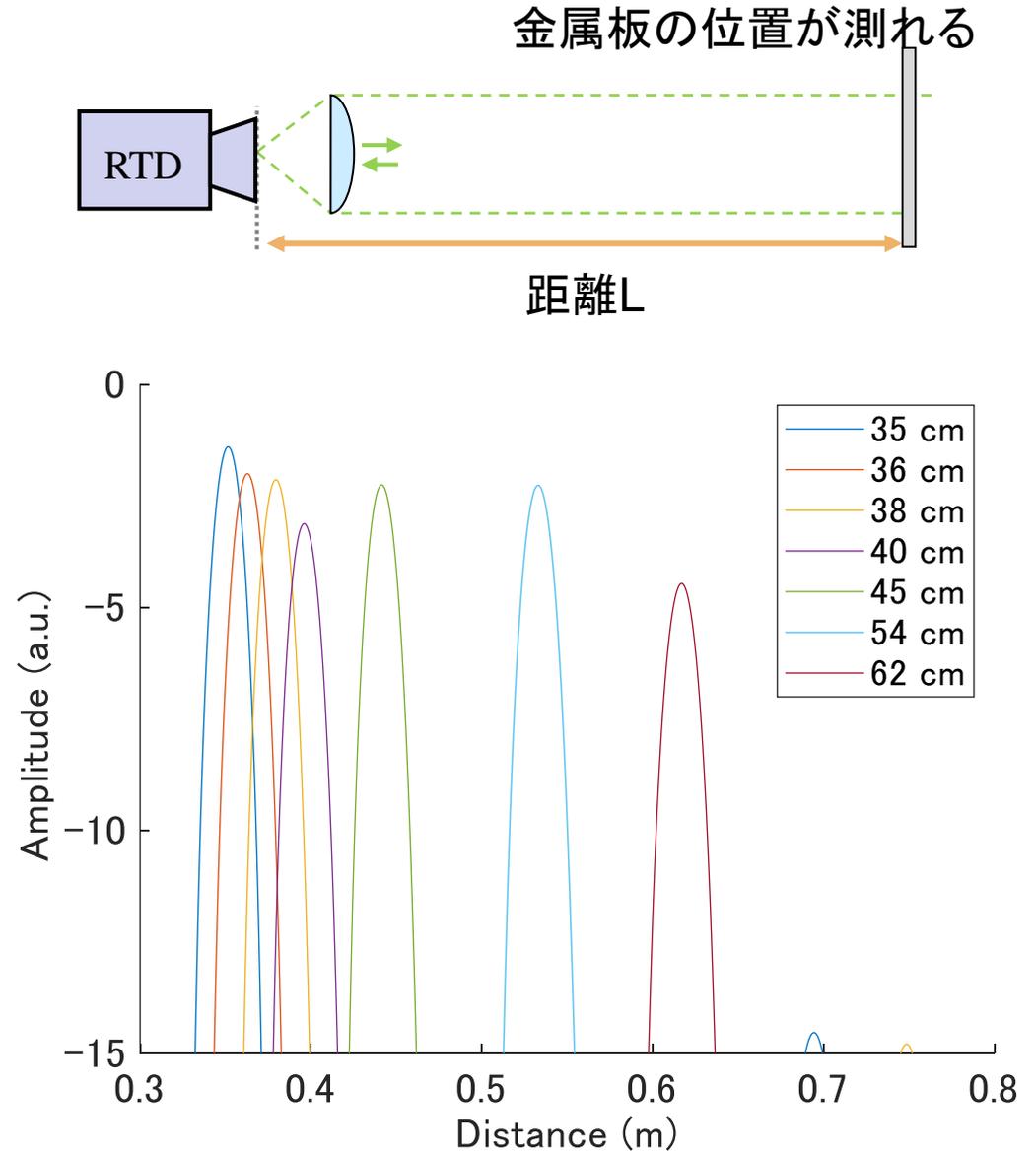


RTD印加電圧の制御で周波数が変えられる

➡ 単体RTDでTHz帯のFMCWレーダを実現

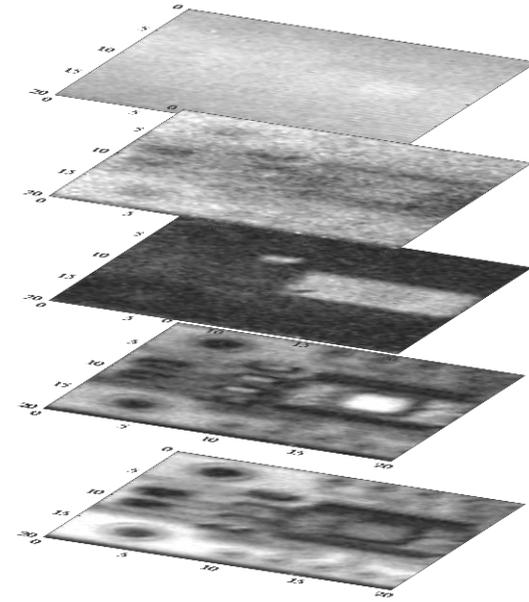
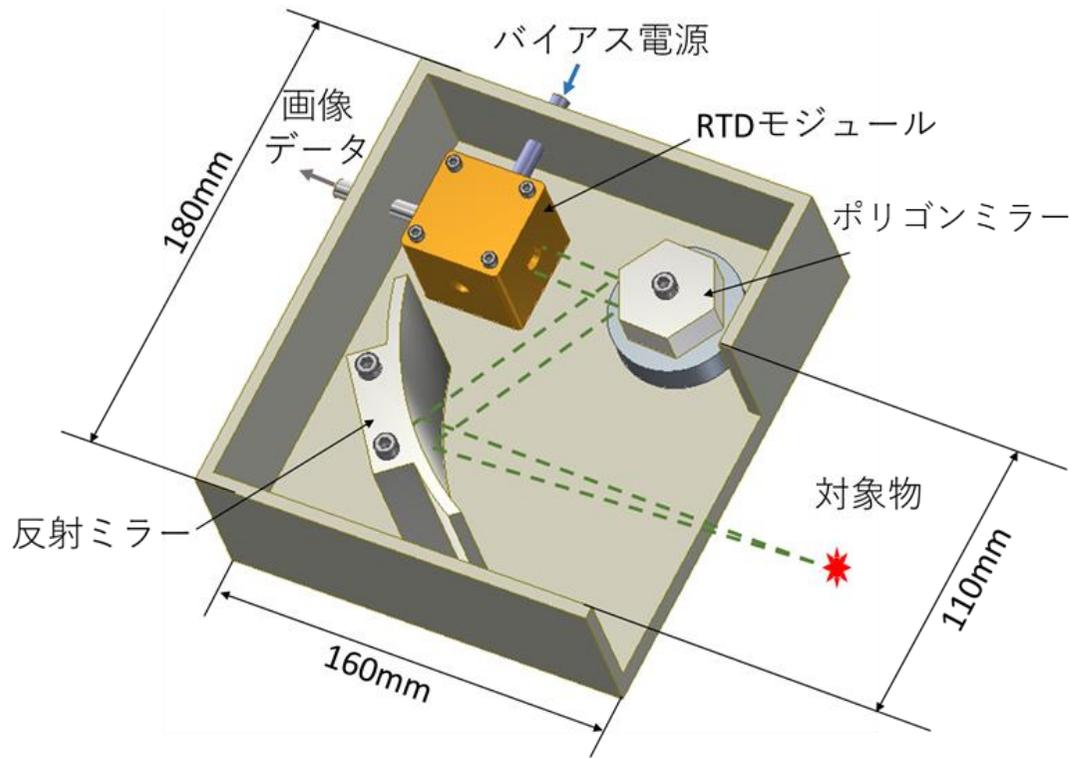
高感度のself-mixing動作で

僅かな出力 (~0.02 mW) で使用可能



RTDレーダの測位結果

RTDレーダの応用例その2



手持ちサイズのシステムで高度なTHz帯
三次元レーダイメージングを実現可能になる

車載レーダシステム:より高い分解能へ



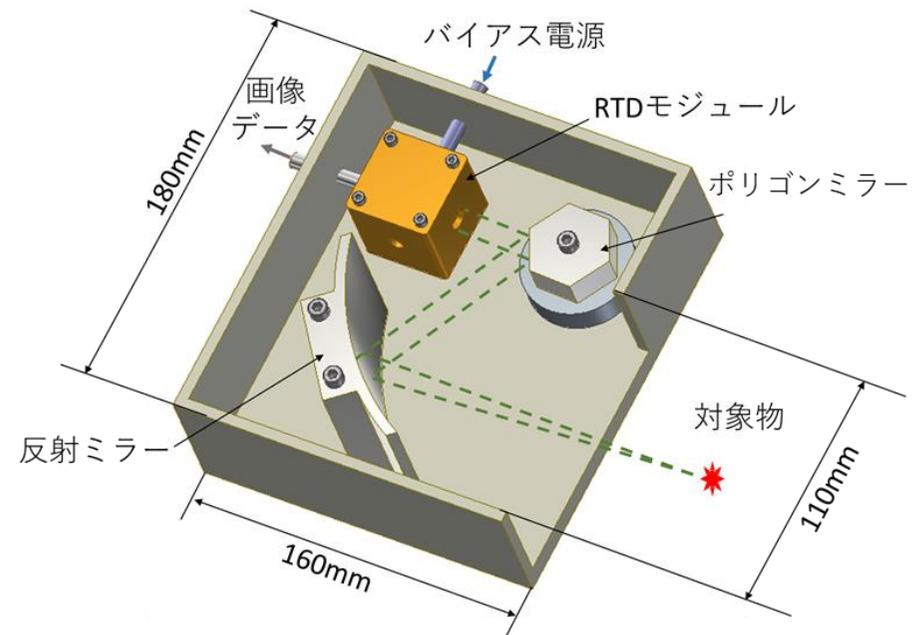
次世代の車載レーダシステムにも期待できる

新技術の特徴・従来技術との比較

- ✓ RTD単体のみで従来高価なTHzデバイスを全部置換できる
- ✓ シンプルな低周波回路の制御でイメージングシステム、CWレーダシステムも実現できる
- ✓ 300GHz帯から600GHz帯、1THz、2THz帯に拡張できるため、より高い帯域(～中心周波数の10%)で高い分解能を獲得できる
- ✓ 制御回路、レーダ信号が低周波になるため、システムのアレイ化、THzカメラなどが可能になる
(未だに発振機能を含むTHzカメラがない)

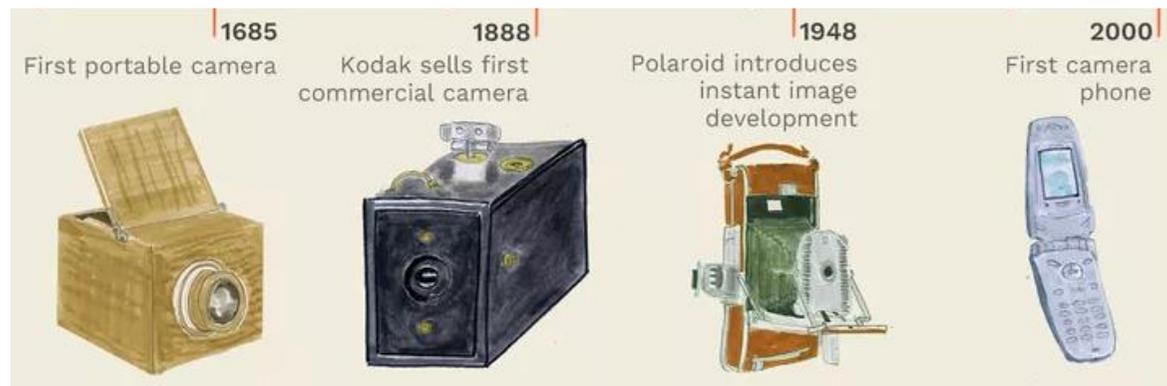
実用化に向けた課題

- ✓ 制御回路の高性能、小型化
- ✓ RTDの高周波、高出力化
(他のプロジェクトで進行中)
- ✓ システムのアレイ化



企業への期待

- ✓ イメージングセンサーの集積・アレイ化技術を持つ企業との共同開発を希望
- ✓ 専用検査装置の開発が可能なので、関連応用への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。
- ✓ 次世代車載レーダ、THzカメラのような少し先の未来技術を想定する企業との共同研究を希望



(<https://www.thesprucecrafts.com/brief-history-of-photography-2688527>)

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 信号検出装置
 - 出願番号 : 特願2022-131358
 - 出願人 : 大阪大学
 - 発明者 : 易利、水野遼子、富士田誠之
-
- 発明の名称 : 信号補正装置および信号補正方法
 - 出願番号 : 特願2023-210597
 - 出願人 : 大阪大学
 - 発明者 : 易利、富士田誠之、猪瀬裕太

お問い合わせ先

大阪大学

共創機構 イノベーション戦略部門 知的財産室

<TEL> 06-6879-4861

<e-mail> tenjikai@uic.osaka-u.ac.jp