

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03827

研究課題名(和文) 周波数シフトテラヘルツ波による建築物非破壊診断

研究課題名(英文) Nondestructive diagnosis of buildings by frequency shifted terahertz waves

研究代表者

水津 光司 (SUIZU, Koji)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：20342800

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,500,000円

研究成果の概要(和文)：電波と光波の中間に位置するテラヘルツ波を用いると、タイルの剥離など、遠隔からの建造物非破壊検査が可能となる。本研究では非破壊検査を目的として、時間と共に周波数が高速に変化するユニークなテラヘルツ波光源の開発を実施した。現場での使用が可能な実用的装置を目指し、3 m以上の測定可能距離レンジを有し、1 mm以下の分解能を持つ装置開発および原理試験に成功した。また、電波・超音波領域で使用されている解析法をテラヘルツ波に導入し、高精度画像化の基礎的な技術開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した周波数シフトテラヘルツ波は、今までに無いオリジナルな動作特性を有するテラヘルツ波光源である。従来のテラヘルツ波による非破壊検査では測定距離レンジの制約などがあり、現場での使用において解決すべき問題が残されていた。本装置の開発によりテラヘルツ波による非破壊検査への応用展開が期待され、建築関連企業との共同研究へと発展している。高度成長期に建設された構造物の老朽化等の社会的問題の解決策の一つとして、安心・安全社会の構築に大きく貢献できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：Terahertz waves enables remote non-destructive inspection of buildings such as peeling of tiles. In this research, we have developed a unique terahertz wave source which has ultra-high speed frequency modulation character, enables non-destructive inspection applications. We have successfully developed the novel terahertz-wave source with a measurable distance range of over 3 m and a resolution of 1 mm or less. The novel terahertz wave source with unique measurement characters would open the door to practical non-destructive inspection in the field. In addition, we developed basic technologies for high-precision imaging of terahertz waves, by introducing analytical methods in radio wave and ultrasonic region.

研究分野：非線形光学

キーワード：テラヘルツ波 周波数シフト帰還型レーザー 非破壊検査

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

高度成長期に建設された建造物の老朽化や、震災による建造物の劣化による事故が相次いでおり、社会的な問題として顕在化しつつある。これらの事故を未然に防ぐためには、迅速かつ理学的計測による定量評価が重要である。現在は主に打音による診断が行われているが、人的および時間的な点でコストがかかることや定量性に欠けることから、超音波計測、電波計測、赤外線計測などの理化学的計測法が開発されつつある。

上記のような社会的背景を鑑みると、遠隔からの建造物検査技術を確立することは、社会的ニーズにソリューションを与えると同時に、安心・安全社会の構築に大きく貢献すると言える。遠隔から非破壊で計測する技術としては、電磁波の利用が有効である。電波と遠赤外の間位置するテラヘルツ波は、透過性と空間分解能に優位性があり、建造物表面付近の検査に適している。テラヘルツ波を用いて震災後の建造物外壁の剥離状況の調査などが実際に行われている。ただし、一般的に普及しているテラヘルツ時間領域分光装置を用いた場合、超短パルス照射して反射パルスの時間から距離情報を得るため、測定距離レンジに対する原理的な制約があり、対象物から数 cm の位置から計測する必要がある。また、剥離が壁面から数 cm 以上深い場所にある場合も検出が困難になる。さらに、材料の吸収特性および屈折率に強い周波数依存性がある場合、パルス波形に大きな変化が生じる。このような状況ではパルス波形がくずれ、位置測定が困難になる。このように、テラヘルツ波自体は非破壊検査にとって非常に有望であるが、超短パルスを使用する場合においては、物理的な問題点および測定器としての問題を抱えており、リアルワールド測定への展開を行うためには、全く別のアプローチが必須である。

### 2. 研究の目的

光領域での距離計測では、周波数シフト帰還型レーザー (Frequency Shifted Feedback laser : FSF レーザー) を用いた周波数領域リフレクトメトリ (Frequency Domain Reflectometry : FDR 計測) を実施することで、測定器からの距離に大きな幅のある対象であっても、ミリメートル未満の精度での精密距離計測が実現されている。FSF レーザーとは、超高速に周波数が変化する特殊なレーザー光源であり、パルスレーザーを光源とした距離計測に対して多くのメリットを有している。本研究では、この FSF レーザーの有するユニークな特性と距離計測における優位性に着目し、同特性をテラヘルツ波に転写することで、測定距離レンジに原理的な制約の無い精密距離測定を実現する。本方式により、リアルワールドで使用可能な、新たな非破壊検査法を確立する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 光源/検出系開発

FSF レーザー光と、中心周波数の差がテラヘルツ波となるように設定した単色レーザー光を合波し、テラヘルツ波発生用の励起光として使用する。この光は、両レーザーの中心周波数の差に応じたテラヘルツ周期のビートを有しており、かつ、当該ビートは FSF レーザーの有する周波数チャープコムの性質を持つ。この励起光を単一走行キャリアフォトダイオード (Uni-Traveling-Carrier Photo Diode: UTC-PD) に入射するとビートに応じた電流が生じ、周波数チャープコムの性質を持つ FS テラヘルツ波が放射される。単色レーザー光の波長を掃引する事により、FS テラヘルツ波の周波数を選択することができる。

テラヘルツ波帯におけるマイケルソン干渉計を構築し、FS テラヘルツ波を信号光と参照光に分け、光路差をつけて合波する。合波された FS テラヘルツ波は、マイケルソン干渉計内での光路差に応じた周波数差を有している。これをショットキーバリアダイオード (Schottky Barrier Diode: SBD) 検出器で検出することで、当該周波数差に応じた RF 周波数成分をもつ電流が発生する。この RF 周波数成分は、励起光源となる FSF レーザー光の特性を反映し、光路差に応じて 0~40MHz の範囲に現れる。かつ、2次以降の高次成分も、40MHz~80MHz、80MHz~120MHz といった周波数帯に現れる。この信号の周波数を解析することで光路差の算出が可能となる。

信号対ノイズ比の向上および計測可能な距離レンジの拡大を目指し、200GHz 帯のテラヘルツ波増幅器を導入して、UTC-PD から発生する FS テラヘルツ波の出力を約 30dB 増幅させた。さらに、SBD 検出に対する改善も行った。SBD 検出器では、テラヘルツ波の入射を検波する形で微弱な電流を発生する。この微弱な電流を、電流電圧変換増幅器によって電圧に変換した上で計測を行う。従来使用していた電流電圧変換増幅器は増幅帯域が約 1MHz と狭く、かつ、低周波領域に電波として周囲に多く存在する環境ノイズの影響が大きかった。そこで、電流電圧変換増幅器に帯域 10GHz の広帯域性能を有するものを使用し、周囲環境ノイズの少ない高次ビート信号の帯域を計測対象とすることで、ノイズの低減を試みた。

#### (2) 信号解析

欠陥位置が未知の対象に対して遠隔かつ非破壊で 3次元断層像を構築するには、コリメートされたテラヘルツ波ビームを照射することになる。この場合、深さ方向の情報は FS テラヘルツ波の距離測定精度で決まり、mm オーダー以下の分解能で欠陥位置を特定できる。一方、面内方

向に関しては、テラヘルツ波ビームの直径 = 分解能となる。コリメートビームの場合には 10mm 程度の大きさとなる。このような状況においては、電波や超音波領域で利用されている合成開口の手法が有効である。

電波領域では、信号空間と雑音空間との直交性を利用して波源の到来方向を高精度に推定する MUSIC 法 (MULTiple Signal Classification) 等、高精度な到来波推定法が精力的に研究されている。また、超音波領域では、異なる検出器位置で得た信号を適宜選択して乗算を行うことでノイズ成分を大幅に低減する相関合成法等、映像コントラストを上げる解析法が精力的に研究されている。いずれの手法も、検出器を移動させ複数の位置で信号を取得する事により、大きな開口での検出と等価な計測を行う手法である。本手法を適用することで、コリメートビームを用いながらテラヘルツ波長と同程度 (1mm 程度) の高分解能化の実現に取り組んだ。

POLAR 法 (POLarimetric Synthetic Aperture Radar) とは、電波照射および検出時に偏波制御を行い、複数の偏波情報から得られる偏波シグネチャを解析することで、反射体の形状を推定する手法である。主に電波領域で研究が進展している。本手法は、壁面内面のひび方向の同定、異物が存在する場合の位置決定等、テラヘルツ波反射の情報だけではコントラストの得られにくい対象に対して極めて有効であり、本方式の適用による欠陥形状の推定精度向上に取り組んだ。

### (3) 建築資材解析

コンクリートの破損は、降水等による内部の空胞への水分再充填、乾燥過程において繰返し生じる応力に起因すると考えられている。建築物資材として重要なコンクリートに対し、内部空胞密度や乾燥過程における水分含有量をパラメータとし、テラヘルツ波帯における反射性、透過性などの基礎的な材料評価を実施することで、非破壊検査において基盤となる情報を蓄積する。かつ、人為的に欠陥部位を生成したコンクリートを測定対象として、FS テラヘルツ波による非破壊検査時の問題点の抽出および改善のフィードバックを行い、新規手法としての有用性の確立に取り組んだ。

## 4. 研究成果

### (1) 光源/検出系開発

研究開始時には  $\mu\text{W}$  レベルであった FS テラヘルツ波出力を 3 桁以上増強させ、10mW を越える光源高出力化に成功した。これにより、20dB を越える SN 比の向上に成功し、ビート信号計測時間を 200 秒から 1 秒程度に大幅に短縮する事に成功した。当初は 10mm 程度であった測定距離レンジも、3m オー

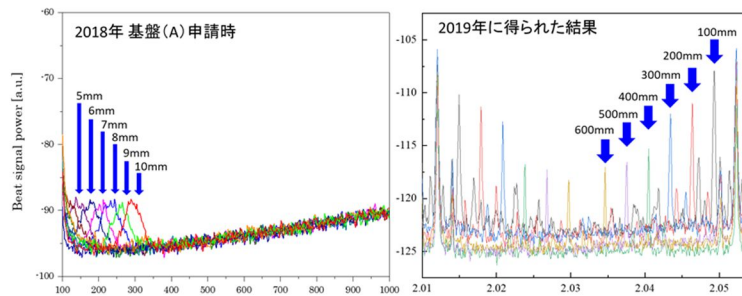


図 1. ビート信号の増強と計測距離レンジの大幅な拡大。

バーへと大幅な拡大に成功した (図 1)。尚、現在の測定レンジは光学定盤の大きさで制約されており、SN 比から考えると 10m を越える距離での測定も十分可能である。

リアルフィールドでの非破壊検査を見据え、代表的な建材であるタイルに対し、周波数シフトテラヘルツ波による厚み測定を実施した。使用したタイルは陶器質タイルで、浴室やトイレ等の水回りや内装として多く利用されるものである。表面反射および裏面反射によるビート信号の取得に成功し、これらの周波数差から見積もられるタイル厚は 5.97mm となった。マイクロメータによるタイル厚の実測値とおおよそ一致しており、実際の建築物非破壊検査へと展開可能な測定が実施できた。

### (2) 信号解析

THz-TDS を用いた高分解能イメージング技術において、偏波方向による反射体間の虚像の削減および凹レンズによる有効映像領域の拡大に成功した。高精度距離測定技術の蓄積として、超音波領域で時間反転波と感度補正を併用した複数チャンネル送信式の有効性、及びターゲット移動するダイナミックの条件下での感度補正信号と自己相関処理の有効性をそれぞれ見出した。層状誘電体の裏にある金属サンプルのイメージング探査に挑戦し、誘電体による伝搬経路歪みの補正手法を提案しその効果を確認できた。超音波領域で

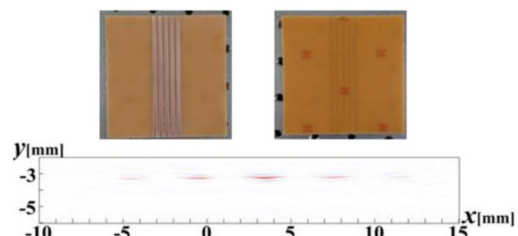


図 2. 相関合成法による誘電体基板裏面の金属ターゲットイメージング例。

低速移動物体の速度測定における自己相関処理の有効性を実験的に確認し、虚像の原因となる表面波成分の抽出のために周波数領域モデルの有効性を見出した。図 2 に示すように誘電体裏面金属の高精度イメージングに成功した。複数の相関次数を用いた映像結果の合成によって探

査対象によらない相関次数のロバスト化を図った。不要波成分を推定するための複素スペクトルモデルの有効性を確認でき、基準信号の位相成分を取り入れることで距離測定のス/N比向上の可能性を見出した。

円弧状合成開口アレーの信号を複数の仮想的な等間隔直線アレー信号に変換して相関低減処理を適用する位置推定法を考案し、従来識別できなかった波長間隔程度のターゲットを識別できることを確認した。図3に示すように、波長程度に接近した金属線の位置推定に成功している。複数の仮想的アレー信号に変換する手法をTHz-TDS測定結果に適用し、ターゲット分離ができることを確認した。圧縮センシングの一手法であるFISTAにより、位置と反射電力を同時推定できることを確認した。測定信号を、仮想的に生成したアレー信号に変換して空間平均を行う手法をTHz-TDS測定結果に適用し、ターゲット分離性能を改善できることを確認した。

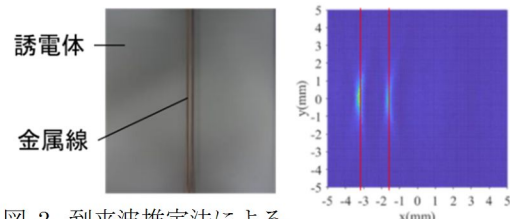


図3. 到来波推定法による位置推定例.

THz-TDSに偏波解析を導入し、広帯域パルスを生かした新たなターゲット識別手法を確立した。かつ、金属平板を用いた校正量を用いることで識別精度が向上することを明らかにした。また、偏波解析だけでなく合成開口処理を導入(THz-POLSAR)することで、従来のテラヘルツセンシングで起こる焦点ずれを起こすことなく、アジマス方向に構造変化を持つターゲットの識別能力向上を実現した。図4のように、金属構造の違いを検出することに成功している。アジマス方向に加えレンジ方向にTHz-POLSARを適用し、レンジ方向における識別能力向上のための問題点を明らかにした。これらを統合し、アジマス方向およびレンジ方向にTHz-POLSARを適用し、レンジ方向における位置検出、偏波解析の校正法について検討した。

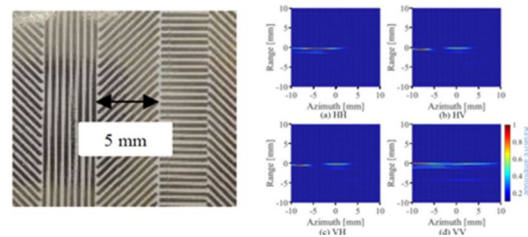


図4. 構造変化を有する金属の位置検出例.

紙で覆われたコンクリート表面のサブミリ幅の亀裂の検出に向けて、近接場散乱を使用した非破壊ミリ波イメージングを実施した。紙の厚さやアンテナの高さが異なる場合に得られる2つのミリ波画像の差を計算することで、ミリ波像におけるひび画像のコントラストを最大3 dB向上することができた。表面粗さの異なるコンクリートの複素誘電率をTHzエリプソメトリにより計測し、適用範囲を明らかにした。紙の厚さやアンテナ高さを精密に制御することにより、ミリ波像におけるひび画像のコントラストを10dB以上向上することができた。図5のようにコントラストの良い亀裂のイメージングに成功している。プローブ信号に60-90 GHzのスペクトル信号を使用し、紙の厚さに依存する定在波が発生する周波数で計測することでも、ひび画像のコントラストを10dB以上向上することができた。

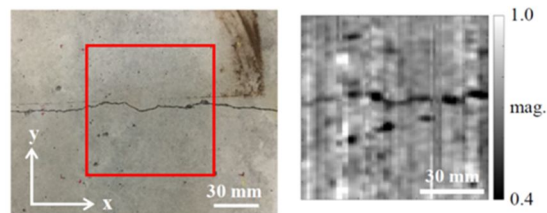


図5. 近接場散乱によるコンクリート亀裂のイメージング例.

### (3) 建築資材解析

水分含有率の異なるコンクリートサンプルに対し、THzエリプソメトリにて複素屈折率測定を実施した。乾燥過程および応力印加時における屈折率の変化が確認された。コンクリートへの負荷応力を定量的に制御するために、ひずみゲージでの計測から力センサーからの算出に変更すると共に、計測系の再構築を行い、応力負荷によってコンクリート複屈折率が変化することが確認された。また、コンクリートによる反射テラヘルツ波の強い偏光依存性に着目することで、応力付加情報を抽出できる可能性を見出した。

IMPATTダイオードによるTHz光源を、カンチレバー・プローブの走査領域下に直接照射できるようなアライメントを可能とする光でこヘッドを設計、作製した。ケルビンプローブ法による電位計測のための電圧フィードバック回路を再設計した。ケルビンプローブ法による電位計測のための電圧フィードバック回路を再設計し、低ノイズ化を図ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Keizo Cho, Kazuki Watakabe, Hiroaki Nakabayashi and Koji Suizu	4. 巻 60
2. 論文標題 Terahertz reflection imaging using virtual arrays and MUSIC in a synthetic aperture array	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 72001, 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac04f0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 水津光司	4. 巻 69
2. 論文標題 テラヘルツ波を用いた非破壊検査に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 非破壊検査 (一般社団法人 非破壊検査協会)	6. 最初と最後の頁 502, 506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Keita Nakayama, Sho Masuda, Nobuo Satoh and Hidekazu Yamamoto	4. 巻 59
2. 論文標題 Evaluation of silicon carbide Schottky barrier diode within guard ring by multifunctional scanning probe microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SN1014-1, 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab9629	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Naoya Ishizaki, Ryo Toh, and Koji Suizu	4. 巻 59
2. 論文標題 THz wave imaging through layered dielectric using correlating synthesis method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 122003-1, 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abc78e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 泉田健吾, 陶良	4. 巻 J103-A
2. 論文標題 周波数領域モデルとLevenberg-Marquardt法を用いた弾性表面波の推定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 222, 228
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 内海 秀幸, 長尾 匠, 菅 洋志	4. 巻 74
2. 論文標題 非等温下における不飽和セメント硬化体の拡散係数に関する解析的研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 74,81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14250/cement.74.74	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 内海秀幸(単独)	4. 巻 70,3
2. 論文標題 コンクリートの水分状態を表現する数理モデル	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 非破壊検査 (一般社団法人 非破壊検査協会)	6. 最初と最後の頁 96,101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 内海秀幸(単独)	4. 巻 57,2
2. 論文標題 熱弾性問題の支配方程式に対する新たなアプローチ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 建設機械	6. 最初と最後の頁 45,50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 内海秀幸, 鈴木誠	4. 巻 58,7
2. 論文標題 コンクリートの熱応力解析に利用可能な熱弾性体の適合条件式	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学(日本コンクリート工学協会)	6. 最初と最後の頁 501,506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 内海秀幸, 菅洋志	4. 巻 41
2. 論文標題 水銀圧入試験の結果を利用したセメント硬化体の水分特性曲線と不飽和透水係数の評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 443,448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 内海秀幸	4. 巻 55
2. 論文標題 コンクリート内部の水分組成を表現する	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 建設機械	6. 最初と最後の頁 49,58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 内海秀幸	4. 巻 57
2. 論文標題 古典的アプローチに基づくコンクリートの水分組成表現	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学	6. 最初と最後の頁 256,261
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/coj.57.4_256	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akihiko Hirata, Makoto Nakashizuka, Koji Suizu, and Yoshikazu Sudo	4. 巻 E103.C, No. 5
2. 論文標題 Contrast Enhancement of 76.5 GHz-band Millimeter-Wave Images using Near-field Scattering for Non-Destructive Detection of Concrete Surface Cracks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 216, 224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2019ECP5034	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Atsushi Doi, Mizuki Nakajima, Sho Masuda, Nobuo Satoh and Hidekazu Yamamoto	4. 巻 58
2. 論文標題 Cross-sectional observation in nanoscale for Si power MOSFET by atomic force microscopy/Kelvin probe force microscopy/scanning capacitance force microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 S11A04-1, 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab1642	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 竹中一孝, 千村大, 陶良	4. 巻 75
2. 論文標題 超音波感度補正型ダブルパルス法を用いた低速移動物体の速度計測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本音響学会誌	6. 最初と最後の頁 323, 329
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20697/jasj.75.6_323	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 荒原克樹, 中林寛暁, 水津光司, 長敬三	4. 巻 J102-B
2. 論文標題 THz-POLARSARによる構造変化を有する2次元ターゲットの観測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 853, 863
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2019APP0006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -



1. 著者名 内海秀幸, 安田知弘, 菅洋志, 鈴木誠	4. 巻 29
2. 論文標題 セメント硬化体の熱膨張特性に関わるHygrothermic coefficientの評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 コンクリート工学論文集	6. 最初と最後の頁 1, 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/crt.29.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kazuma Sato, Ryo Toh and Koji Suizu	4. 巻 57
2. 論文標題 Terahertz imaging for multiple reflectors using time-domain correlating synthesis method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 122502-1, 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.122502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 中瀬桃香, 陶良	4. 巻 46
2. 論文標題 複数送信式時間反転法と感度補正型信号を併用した水中距離測定	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 海洋音響学会誌	6. 最初と最後の頁 1, 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3135/jmasj.46.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Kamagata, Hiroaki Nakabayashi, Koji Suizu, and Keizo Cho	4. 巻 7
2. 論文標題 Identification of Periodic Structure Target Using Broadband Polarimetry in Terahertz Radiation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 266, 271
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2018XBL0032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 瀬戸口直人, 中林寛暁, 長敬三	4. 巻 J101-B
2. 論文標題 仲上ライスフェージングの伝搬パラメータ推定値を用いた自己回帰モデルによる見通し内環境におけるチャンネル推定	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 685, 695
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2018APP0011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐々木政直, 中林寛暁	4. 巻 J101-B
2. 論文標題 Massive MIMOにおけるユーザ間干渉に着目したチャンネル容量最大化規範ユーザスケジューリング法の性能評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 770, 779
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2018APP0009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計52件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 水津光司, 江島直紀, 徳山翔貴, 三嶋拓望
2. 発表標題 二次非線形光学効果によるテラヘルツ波検出
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会 総合大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 N. Satoh, A. Doi, H. Yamamoto
2. 発表標題 Investigation of power semiconductor devices under applying voltage by multi-purpose scanning probe microscope
3. 学会等名 IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in ASIA 2020 (WiPDA-Asia) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Kato, K. Nakayama, N. Satoh, H. Yamamoto
2. 発表標題 Evaluation of internal structure of GaN high electron mobility transistor
3. 学会等名 28th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM28) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田晃高, 土井敦史, 佐藤宣夫
2. 発表標題 走査型プローブ顕微鏡用の電圧フィードバック制御回路の小型化とその周波数特性
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 出口雄一, 佐藤宣夫
2. 発表標題 走査型プローブ顕微鏡を用いた焦電素子のナノスケール観測
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 土井敦史, 田中一光, 佐藤宣夫, 山本秀和
2. 発表標題 走査型プローブ顕微鏡を用いたSiC製パワー半導体デバイスのナノスケール観測
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 五十部正拓, 陶良
2. 発表標題 位相考慮型AFM感度補正信号と時間反転波を用いた距離測定
3. 学会等名 海洋音響学会2020年度研究発表会講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳理央, 長敬三, 中林寛暁, 水津光司
2. 発表標題 THzイメージングにおける圧縮センシングによる点波源ターゲットの位置推定
3. 学会等名 電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akihiko Hirata, Koji Suizu, Yoshikazu Sudo, Issei Watanabe, Norihiko Sekine, and Akifumi Kasamatsu
2. 発表標題 Non-destructive Inspection of Concrete Surface Crack Using Near-Field Scattering
3. 学会等名 2020 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 枚田 明彦, 中静 真, 水津 光司, 須藤 佳一
2. 発表標題 コンクリート非破壊検査に向けた76.5GHz帯ミリ波イメージングのコントラスト強調技術
3. 学会等名 電子情報通信学会 マイクロ波研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水津光司
2. 発表標題 テラヘルツ波を用いた非破壊検査に関する研究
3. 学会等名 (一社)日本非破壊検査協会保守検査部門 令和元年度第2回保守検査部門ミニシンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江島直紀, 小森博樹, 水津光司, 諸橋功, 小川洋, 中島慎也, 関根徳彦, 竇迫巖
2. 発表標題 プロトン交換導波路によるテラヘルツエバネッセント波分光のノイズの低減
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小森博樹, 江島直紀, 高田了一, 水津光司, 諸橋功, 小川洋, 中島慎也, 関根徳彦, 竇迫巖
2. 発表標題 プロトン交換導波路を用いたテラヘルツエバネッセント波分光によるガスセンシング
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武藤奨, 水津光司, 諸橋功, 小川洋, 中島慎也, 関根徳彦, 竇迫巖
2. 発表標題 チェレンコフ位相整合による光導波路構造を用いたテラヘルツ波検出の検討
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口雅輝, 本條実, 水津光司, 碓智文
2. 発表標題 周波数シフトテラヘルツ波の高出力化
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江島直紀, 小森博樹, 徳山翔貴, 三嶋拓望, 水津光司, 諸橋功, 小川洋, 中島慎也, 関根徳彦, 竇迫巖
2. 発表標題 ロトン交換導波路によるテラヘルツエバネッセント波分光における距離依存性
3. 学会等名 2019年シンポジウムテラヘルツ科学の最先端
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武藤奨, 水津光司, 諸橋功, 小川洋, 中島慎也, 関根徳彦, 竇迫巖
2. 発表標題 チェレンコフ位相整合による光導波路構造を用いたテラヘルツ波検出の検討
3. 学会等名 2019年シンポジウムテラヘルツ科学の最先端
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口雅輝, 本條実, 水津光司, 碓智文
2. 発表標題 周波数シフトテラヘルツ波の高出力化による測定距離レンジの拡張
3. 学会等名 2019年シンポジウムテラヘルツ科学の最先端
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Doi, N. Satoh, H. Yamamoto, Y.M iyato, H. Nozaki, H. Nakamoto, and Y. Terui
2. 発表標題 Observation of power semiconductor devices on cross-sectional surface by scanning probe microscope
3. 学会等名 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nakayama, S. Masuda, N. Satoh, and H. Yamamoto
2. 発表標題 Nanoscale observation of power semiconductor devices in operation state by scanning probe microscope
3. 学会等名 27th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM27) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土井敦史, 増田翔, 佐藤宣夫, 山本秀和
2. 発表標題 走査型プローブ顕微鏡によるパワー半導体素子内部構造の観測
3. 学会等名 2019年電気学会 産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田晃高, 土井敦史, 佐藤宣夫
2. 発表標題 電圧フィードバック制御回路の製作とその評価
3. 学会等名 令和2年 電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akihiko Hirata, Makoto Nakashizuka, Koji Suizu, and Yoshikazu Sudo
2. 発表標題 Improvement of Detection in Concrete Surface Cracks Covered with Paper by Using Standing Wave of 77-GHz-Band Millimeter-Wave
3. 学会等名 IEEE International Microwave Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 枚田明彦, 中静真, 水津光司, 須藤佳一
2. 発表標題 近接場散乱を使用したミリ波イメージングのコントラスト向上
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuki Watakabe, Keizo Cho, Hiroaki Nakabayashi
2. 発表標題 Improvement of Target Discrimination using Virtual Array and MUSIC in Terahertz time domain spectroscopy Imaging
3. 学会等名 The 2nd Indonesia-Japan Workshop on Antennas and Wireless Technology 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuki Watakabe, Keizo Cho, Hiroaki Nakabayashi
2. 発表標題 Influence of the location of virtual linear array on position estimation using MUSIC algorithm applied to arc array synthetic aperture radar imaging
3. 学会等名 The 2019 Malaysia-Japan Workshop on Radio Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Kazuki Watakabe, Keizo Cho, Hiroaki Nakabayashi
2. 発表標題 THz Radar Imaging using MUSIC and Array Interpolated Virtual Array
3. 学会等名 2019 URSI -Japan Radio Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡壁一樹, 長敬三, 中林寛暁, 水津光司
2. 発表標題 複数仮想アレーを用いた空間平均MUSICのTHz-TDS測定への適用結果
3. 学会等名 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keizo Cho
2. 発表標題 Improvement of location estimation accuracy applying virtual array technique to synthetic aperture array for terahertz time domain spectroscopy
3. 学会等名 2019 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石崎直哉, 陶良, 水津光司
2. 発表標題 層状誘電体が相関合成法を用いたTHz波イメージングに与える影響
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 泉田健吾, 陶良
2. 発表標題 地中埋設物の三次元映像化 - 表面波モデルについて -
3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀越謙三郎, 陶良
2. 発表標題 複数送信式 AFM 感度補正型信号を使用した水中距離測定 - 開口幅の影響について -
3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石崎直哉, 陶良, 水津光司
2. 発表標題 THz波相関合成イメージング法における相関間隔のロバスト化
3. 学会等名 2019年シンポジウムテラヘルツ科学の最先端
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤原陸, 荒原克樹, 相馬翔太, 中林寛暁, 水津光司, 長敬三
2. 発表標題 テラヘルツセンシングのための実スケール簡易FDTD法
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水津 光司
2. 発表標題 テラヘルツ波とは ?その発生・検知・分析について?
3. 学会等名 建築研究開発コンソーシアムテクニカルフォーラム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水津 光司, 栗原貴大, 碓智文
2. 発表標題 周波数シフトテラヘルツ波の発生と非破壊検査への応用
3. 学会等名 電子情報通信学会光応用電磁界計測 (PEM) 特別研究専門委員会第4回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水津 光司, 栗原貴大, 碓智文
2. 発表標題 周波数シフトテラヘルツ波による非破壊検査の検討
3. 学会等名 理研セミナー (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栗原 貴大, 南部 広樹, 水津 光司, 碓 智文
2. 発表標題 周波数シフトテラヘルツ波による距離計測
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗原 貴大, 南部 広樹, 水津 光司, 碓 智文
2. 発表標題 周波数シフトテラヘルツ波による距離計測
3. 学会等名 シンポジウム テラヘルツ科学の最先端
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木 承太郎, 水津 光司, 内海 秀幸
2. 発表標題 テラヘルツ波によるコンクリート建造物応力診断方法の検討
3. 学会等名 シンポジウム テラヘルツ科学の最先端
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤数馬, 陶良, 水津光司
2. 発表標題 相関合成法を用いたテラヘルツ波イメージングにおける多重反射波の影響について
3. 学会等名 電子情報通信学会超音波研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中瀬 桃香, 千村 大, 陶 良
2. 発表標題 感度補正型信号を用いた複数送信式水中距離測定における時間反転法の効果について
3. 学会等名 日本音響学会2018年秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉田 健吾, 千村 大, 陶 良
2. 発表標題 地中埋設物の三次元映像化 - 映像値分布を用いた地中音速の推定 -
3. 学会等名 日本音響学会2018年秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 リュウミンブン, 陶良
2. 発表標題 超音波水中無線通信 - 応答特性による符号間干渉の抑制について
3. 学会等名 電子情報通信学会超音波研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuki Watakabe, Keizo Cho, Hiroaki Nakabayashi
2. 発表標題 Position estimation using MUSIC method applied to interpolated three linear array
3. 学会等名 2018 Asian Workshop on Antennas and Propagation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuki Watakabe, Keizo Cho, Hiroaki Nakabayashi
2. 発表標題 Study on improvement of position estimation accuracy of MUSIC method using array interpolation and spatial averaging
3. 学会等名 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡壁一樹, 長敬三, 中林寛暁, 水津光司
2. 発表標題 仮想アレーを用いたTHz-TDS測定による金属棒位置の推定
3. 学会等名 シンポジウム テラヘルツ科学の最先端V
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katsuki Arahara, Hiroaki Nakabayashi, Koji Suizu, and Keizo Cho
2. 発表標題 Observation of Composite Periodicity Structure Using POLSAR in Terahertz Waves
3. 学会等名 2018 IEEE International Workshop on Electromagnetics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuya Nitsu and Hiroaki Nakabayashi
2. 発表標題 A Study of User Capacity for Massive MIMO in Urban Street Canyon Environment
3. 学会等名 2018 IEEE International Workshop on Electromagnetics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榊昂也, 中林寛暁, 長敬三
2. 発表標題 見通し内ストリートキャニオン環境における自己相関理論式を用いたチャネル予測精度
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 荒原克樹, 中林寛暁, 水津光司, 長敬三
2. 発表標題 THz-POLSARによる構造変化を有するターゲットの観測
3. 学会等名 電子情報通信学会無線端末・アンテナシステム測定技術研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中林寛暁, 糸井清晃, 秋山慶伍, 山崎滉生
2. 発表標題 代表的な伝搬モデルを効果的に融合した伝搬損失推定
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	長 敬三  (CHO Keizo)  (00633356)	千葉工業大学・工学部・教授    (32503)	
研究分担者	内海 秀幸  (UTSUMI Hideyuki)  (10316804)	千葉工業大学・創造工学部・教授    (32503)	
研究分担者	中林 寛暁  (NAKABAYASHI Hiroaki)  (20296320)	千葉工業大学・工学部・准教授    (32503)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	枚田 明彦  (HIRATA Akihiko)  (40500674)	千葉工業大学・工学部・教授    (32503)	
研究分担者	陶 良  (TOH Ryo)  (60327161)	千葉工業大学・工学部・教授    (32503)	
研究分担者	佐藤 宣夫  (SATOH Nobuo)  (70397602)	千葉工業大学・工学部・教授    (32503)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関