

研究終了報告書

「透過型触刺激法の確立と認識行動支援への応用」

研究期間：2018年10月～2022年3月

研究者：門内 靖明

1. 研究のねらい

人の身体に対してセンサやアクチュエータを密着させることなく計測や制御を行い、認識行動を支援するための非接触技術の研究を行う。センサやアクチュエータを非接触化することで、身体の動作を拘束したり不快感を与えたりしないようにするだけでなく、皮膚を身体内外の物理情報空間をつなぐためのチャンネルとして利用できるようにすることを目指す。

そのための具体的なアプローチとして、テラヘルツ波(電波と光の中間の0.1 THz程度の電磁波)の媒質透過性および水への吸収性を利用する。テラヘルツ波は可視光よりも波長が長いので、衣服を透過して身体表面にアクセスできる。一方、マイクロ波よりも波長が短いため、mm オーダの空間分解能を持つことができる。また他の波長帯と比べて水への吸収が大きいため、身体に照射すると皮膚表面で顕著な吸収・反射が生じる。テラヘルツ波を高い強度で連続的に照射すると皮膚温度が上昇して熱覚が生じると考えられるが、このとき照射を変調するとオンオフに同期した高速な加熱・冷却サイクルが生じ、熱膨張により体積が振動的に変化して触覚が生じる可能性がある。その場合であっても、加熱領域が皮膚表面のみに限定されるため深部臓器に影響を与えるリスクは低いと考えられる。また、皮膚表面にテラヘルツ波が入射する場合、吸収とともに屈折率不整合による反射が生じ、その反射位相は生体表面の微小振動などを反映したものになると考えられる。このように、テラヘルツ波を身体に照射する場合には多彩な作用機序が考えられ、それを解明・応用することを試みる。

電波と光の中間のテラヘルツ波は長らく発生・検出すること自体が困難であったが、近年になって高周波半導体技術が整い始め、分光イメージングや超高速無線通信への応用が盛んに議論されるようになってきた。しかし、テラヘルツ関連装置は現時点ではコモディティ化されておらず、本研究を進めるためには電子工作のように自在に試行錯誤できる環境の構築が不可欠である。そこでまず、高出力のテラヘルツ波を発生し、かつ任意に変調するための手法を確立する。それを用いて、対象にテラヘルツ波を変調照射する際に生じる現象を系統的に調べる。その結果に基づいて生体を計測制御できるようにし、視聴覚への認知負荷の緩和や触感のカスタマイズ、技能の身体的チュートリアルなどの応用展開に繋がる技術基盤を確立する。

2. 研究成果

(1) 概要

テラヘルツ波の媒質透過性および水への吸収性に基づいて、身体を非接触的に計測制御するための研究に取り組んだ。まず、研究を進めるための基盤ツールとして、高出力のテラヘルツ波を発生し、かつ任意に変調するための手法を確立した。そして、水を含む対象にテラヘルツ波を変調照射することで内部に非接触的に超音波を発生する方法を考案し、実証した。他の波長帯と比べて、テラヘルツ波は水で顕著に吸収されるため、対象に対して外部から吸収体を塗布・添加することなく内部に直接超音波を生成できると考えられる。そこでまず、体積や温度をコントロールした密閉容器中の水を用いて系統的な調査を行い、テラヘルツ波が超音波に変換されるプロセスを定量的に調べた。そして、体表などの水分を含む対象に変調照射すると内部に超音波が伝搬することを確認した。この成果により、例えば対象にプローブを密着させることなく非接触的に超音波計測を行える可能性が拓かれる。

次に、このようにして生成される音響信号を人の触覚受容器で感じ取ることができるか検討したところ、電波防護指針の範囲内の照射強度で知覚可能な強度の圧力を生成することは容易でないことが分かってきた。一方、提案方法では機械共振を用いずに超音波を生成できるため、既存の超音波振動子では不可能なブロードバンド動作が可能なることも分かってきた。この手法は今後、電波伝搬の困難な領域中での通信技術としても活用できる可能性がある。

また、構築された装置を非接触な熱覚ディスプレイとして使い、人の行動を誘導する研究にも着手した。空間選択的な加熱を衣服越しに行うことによって身体の姿勢を制御できる可能性を検証する実験を行った。今後、より多くの被験者実験を行う必要があるものの、ユーザに認知的な負荷を与えることなく身体の姿勢を定義できる可能性が示唆されている。

また、皮膚表面にテラヘルツ波が入射する際に生じる反射波の位相を取得する方法を提案し、心拍動のような微小振動を衣服越しに計測できることを実証した。可視光で不透明な媒質越しの振動計測が可能なることから、ヘルスケアや産業用検査などに応用できる可能性がある。

(2) 詳細

【テラヘルツ波を用いる音響波生成に関する研究】

生体のように水を含む対象にテラヘルツ波を変調照射することで、内部に非接触的に超音波を発生する方法を考案し、実証した。一般に、可視・赤外光はテラヘルツ波よりも水への吸収が小さいため、レーザー光を用いた光音響効果により試料中に超音波を励振するためには試料内部に吸収体の存在が必要となる。一方、テラヘルツ波を照射する場合、水自体が吸収体となるため、皮膚下に音響波を直接生成できると考えられる。その性質に基づいて生体を計測制御することを目的として本研究に取り組んだ。

テラヘルツ関連装置は現時点ではコモディティ化されていないが、本研究を進めるためには電子工作のように自在に試行錯誤できる環境の構築が不可欠である。そこでまず、強力なテラヘルツ波を発生して任意に変調するための手法を確立した。構築された装置を用いて、対象にテラヘルツ波を変調照射する際に生じる音響信号を調べた(図 1)。具体的には、密閉容器内に水中超音波が生成される際に外部に漏れ出る空中超音波をマイクで計測する実験を行っ

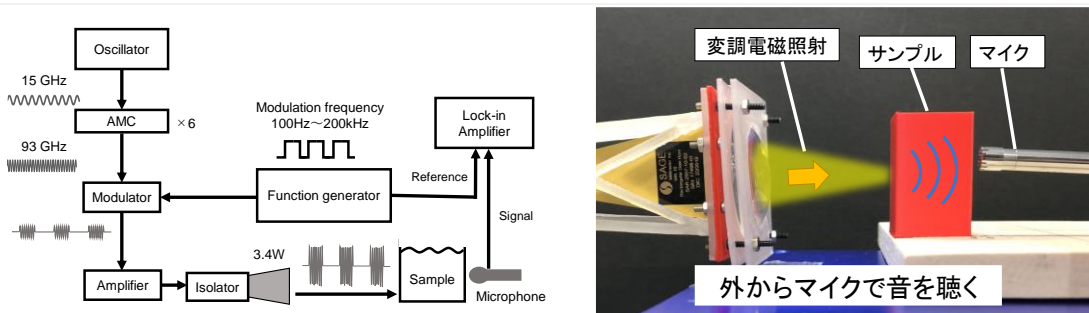


図 1 変調テラヘルツ波を対象に照射する実験系の概要図

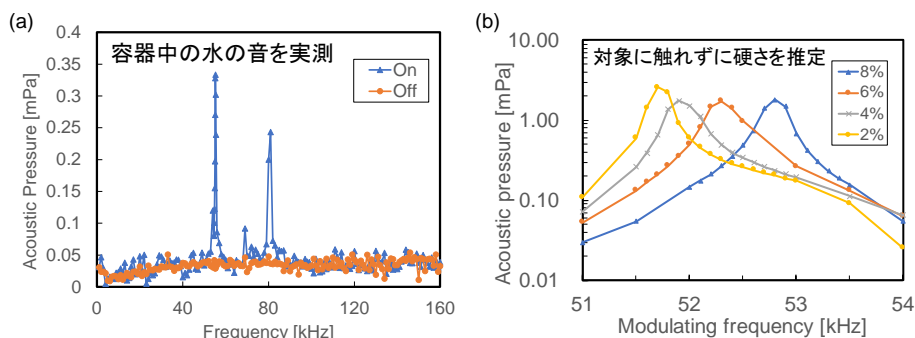


図 2 (a) 異なる寸法の容器中に密閉された水に変調照射する際に生成される音響スペクトル, (b) 異なる濃度のゼラチンに対するスペクトル変化。

た。その結果、水の表面にテラヘルツ波を照射すると水中超音波が生じることが分かった。その際、容器形状により定まる共振周波数が生じることを確認した(図 2 (a))。また、異なる濃度のゼラチンに対して共振周波数が変化することを確認し、対象に触れずに硬さを推定できることを原理実証した(図 2 (b))。

次に、このようにして生成される音響信号を人の触覚受容器で感じ取ることができるか検討した。その結果、電波防護指針の範囲内の照射強度で知覚可能な強度の圧力を生成することは容易でないことが分かってきた。一方、提案方法では機械共振を用いずに超音波を生成できるため、既存の超音波振動子では不可能なブロードバンド動作が可能とも分かってきた。この技術は今後、非接触的な計測制御に限らず、電波伝搬の困難な領域中での通信技術としても活用できる可能性がある。

【非接触熱刺激伝達に関する研究】

他方、構築された装置を非接触な熱覚ディスプレイとして応用し、熱刺激を用いて人の行動を誘導する研究にも着手した。具体的には、空間選択的な加熱を衣服越しに行うことによって、ユーザに認知的な負荷を与えることなく身体の姿勢を制御できる可能性を検証した。被験者の背面に 2 台のホーンアンテナ

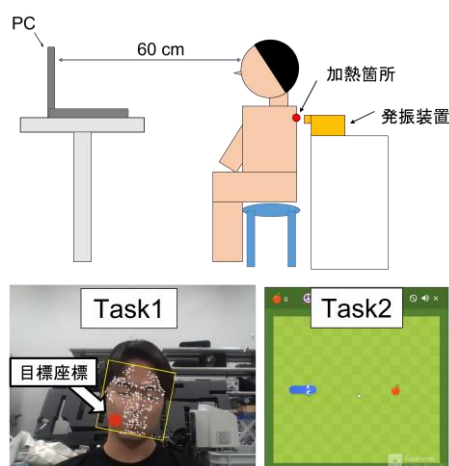


図 3 テラヘルツ波照射を個別制御可能な実験系の構成ならびに Task1(顔の左右の傾きを調整)と Task2(ゲームをプレイ)の説明。

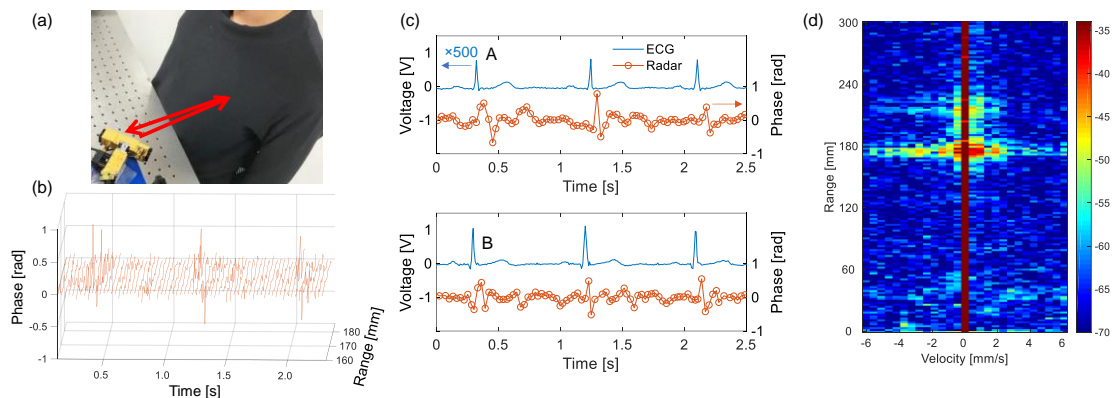


図 4 (a) 衣服透過型心拍計測の実験. (b, c) 心拍に伴う反射波の位相差を時系列信号として表示し、心電図 ECG と比較. (d) レーダー信号のレンジドップラマップによる表現.

からテラヘルツ波を選択的に照射する実験を行った。図 3 のような実験系を用いて自分の顔の向きを指定された位置に向けて傾けながら (Task1)、PC 上で簡単なゲームをプレイし (Task2)、顔の目標位置を視覚、聴覚、触覚、熱覚のそれぞれのモダリティで提示したときの応答性の違いを比較した。その結果、シングルタスク (Task1 のみ) またはマルチタスク (Task1, 2 同時) のいずれの場合でも、顔を視覚情報に基づいて動かす場合が最も正確で熱覚情報に基づいて動かす場合が最も不正確となったものの、両者の違いはマルチタスクの時には縮まった。マルチタスク環境下でユーザーに認知的な負荷を与えることなく身体の姿勢を定義できる可能性が示唆された。

【テラヘルツレーダーによる心拍計測と社会実装に向けた取り組み】

皮膚表面にテラヘルツ波が入射する場合に生じる反射波の位相を取得する方法を提案し、心拍動のような体表面の微小振動を衣服越しに計測できることを実証した。テラヘルツ波をレーダーとして応用すると、電波よりも分解能が高く、光よりも透過性が高い計測が可能になる。これまでも、マイクロ波を用いて心拍に伴う胸部の微小変位を非接触で計測する技術は存在していたが、その波長が長い聴診器のように心臓の詳細な動きを取得することはできなかった。一方、より波長の短い赤外線を使えば高分解能計測が可能になるもの、衣服への透過性が低く着衣のままの計測は困難である。そこで、テラヘルツ波を用いると微小振動を着衣のまま非接触計測できると考えられる。しかし、テラヘルツ帯ではフェーズシフタやサーキュレータとして実用的な素子が存在せず、コンパクトなレーダーシステムを構築することは難しい。この課題を解決するため、テラヘルツ導波路からの漏れ波を利用する方法を提案・実証した (図 4)。心臓の拍動を表す変位を読み取ることができる。また、参照用に別途取得した心電図 (Electrocardiogram, ECG) と同期して観測されることが分かる。このように、テラヘルツレーダーを用いることで聴診器のような情報を非接触的に取得できることから、短時間で簡便に、衛生面やプライバシー上の懸念も和らげながらヘルスチェックを行える可能性が拓かれる。

3. 今後の展開

本研究により、生体への変調照射により音響信号が生成され、そのスペクトルは媒質と境界条件に特有のパターンとなることが分かった。今後、照射の条件を変化させながらデータを取得・解析する方法を確立・発展させることで、非接触かつ非侵襲的に対象の内部状態をセンシング可能な手法を確立していく。それにより、例えば超音波エコープローブの非接触化を目指す。超音波エコーは生体内部の医療診断手法としてよく用いられるが、体内外で音響信号をやりとりするにはジェルの塗布やプローブの密着が不可欠となり計測の活用場面を著しく制約している。例えば日常生活中やスポーツ中などにおける継続的な計測は困難になる。今回の研究成果を発展させることで、そのようなプローブを非接触化していくことを目指す。また今回、皮膚表面にテラヘルツ波が入射する際に生じる反射波の位相を取得することで、心拍動のような微小振動を可視光で不透明な媒質越しに計測できることを実証した。位相を安定的に取得する方法についても発展させていき、ヘルスケアや産業用検査などの分野で実用化していくことを目指す。

4. 自己評価

可視・赤外光よりも水への吸収が大きいテラヘルツ波を生体試料に変調照射することで、外部から吸収体を付加・添加することなく試料内部に超音波を発生する方法を考案し、実証することができた。当初はそれを人の触覚受容器で感じ取れるようにすることまでを大目標として掲げたが、電波防護指針の基準の範囲内でそのような強度の音圧を生成することは容易ではないことも分かってきた。今後テラヘルツ波の瞬間的なピーク電力を高められれば平均電力を上げることなく音圧を高められる可能性があるため、そのための挑戦を今後も続けていく。他方、提案手法を用いると、その非接触性ゆえに、既存の機械式の超音波振動子では困難なブロードバンドな超音波生成が可能になったことは大きな収穫であった。今後この成果をベースとして、従来は困難であった生体周辺の計測や通信の非接触化に向けて、さらなる研究に取り組んでいく。また、テラヘルツ波のビーム制御技術やレーダー信号処理技術も着実に進展させることができ、民間企業との連携も進展している。

以上のように、達成できなかった大目標はあるものの、それに挑むプロセスを通じて新たに達成できたことも多く新たな大目標も生まれた。今後、本研究期間を通して得られた研究の種を大きな潮流として広げていくには、メソッドの体系化が不可欠であると認識している。そのためにも、本研究をきっかけとして始まった様々な連携を一層進めていきたい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 5件

1. Hironori Matsumoto, Issei Watanabe, Akifumi Kasamatsu, and Yasuaki Monnai, "Integrated terahertz radar based on leaky-wave coherence tomography," *Nature Electronics*, 3, 122-129, 2020.

漏れ波アンテナを用いて集積化されたテラヘルツレーダーを構成する手法を提案した。また、それを用いて人の胸部の心拍振動を衣服越しに非接触検出できることを実証した。テラヘルツ帯ではビーム走査に必要なフェーズシフタや、送受信波の分離に必要なサーキュレー

タとして実用的な素子が存在せず、コンパクトなレーダーシステムを構築することは難しい。そこで、テラヘルツ導波路からの漏れ波を利用する方法を提案・実証した。

2. Soichiro Ueno and Yasuaki Monnai, “Wireless Soft Actuator Based on Liquid-Gas Phase Transition Controlled by Millimeter-Wave Irradiation,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 6483–6488, 2020.

高周波電磁波の加熱作用を応用してアクチュエータを無線化する手法を提案した。伸縮可能な容器(ベローズ)内に低沸点液体に封入後、電磁波を照射して加熱することで取り出される力学的な仕事に関して解析した。出力可能な仕事はベローズ内に封入された液量によって決まり、最大の力は飽和蒸気圧において得られることが分かった。非接触かつ軽くて柔らかい動力源として、衣服や家具などの内側に組み込んで使用できることを原理実証した。

3. Kazuto Sato, and Yasuaki Monnai. “Two-Dimensional Terahertz Beam Steering Based on Trajectory Deflection of Leaky-Mode.” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol.11, no.6, pp. 676–683, 2021.

テラヘルツ波ビーム指向性を2軸制御する方法を提案した。導体板間を TE モードで伝搬するテラヘルツ波に対して、微小な傾斜を制御して実効屈折率の勾配を形成し、移送器を用いずにビームを水平走査できるようにした。また、片側の導体板をメッシュ構造で置き換えて波動の漏れが生じるようにし、周波数を掃引することでビームを垂直方向に走査できるようにした。これらを組み合わせることで、ビームを2自由度走査可能なことを実証した。

(2)特許出願

研究期間全出願件数:0件(特許公開前のもも含む)

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

【主要な学会発表】

- ・上野 聡一郎、門内 靖明、体表の高速電磁加熱による情報提示の研究、第 22 回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 2021 年 12 月 15 日。
- ・Natsumi Ichikawa and Yasuaki Monnai, “Detection of sub-terahertz photoacoustic effect for non-contact material sensing,” International Measurement Confederation (IMEKO) 2021, Yokohama, Japan, 30.08.2021. (*Young Excellent Presentation Award*)

【受賞】

- ・門内靖明、令和3年度東京大学卓越研究員 (2021.11.18)

【著作】

- ・分担執筆(斗内政吉 監修)、「テラヘルツ波技術の新展開」、シーエムシー出版(in press)

【プレスリリース】

- ・慶應義塾大学・NICT プレスリリース:衣服越しに心拍を非接触計測できる技術を開発—テラヘルツ波の走査から検波までの機能を導波路構造上で集積実装— 2020/01/28
<https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/2020/1/28/28-67080/>
<https://www.nict.go.jp/press/2020/01/28-2.html>
- ・日経産業新聞「先端技術:衣服着たまま心拍計測」、2020 年 2 月 17 日。