

## テラヘルツ波でイオンを移動させることに成功

～イオンの超高速制御への第一歩～



国立大学法人  
徳島大学



横浜国立大学  
YOKOHAMA National University



公益財団法人  
豊田理化学研究所

### ポイント

- ・ テラヘルツ波で誘起する物性変化は電子の運動変化に基づくものが大半で、イオンの状態変化によるものはごく限られていた。
- ・ 本研究では、テラヘルツ波によってイオンの状態変化を引き起こし、その証拠となるイオンの流れを電流として計測した。また、イオンの流れはピコ秒のタイムスケールで完結することを明らかにした。
- ・ 本研究の成果は、イオンの制御を軸とした「超高速イオニクス」への第一歩となる。

### 【研究概要】

徳島大学の南康夫特任准教授(2016年7月まで横浜国立大学助教)、横浜国立大学の武田淳教授・片山郁文教授、豊田理化学研究所の末元徹フェロー、マサチューセッツ工科大学(米国)の Keith A. Nelson 教授・Benjamin Ofori-Okai 博士・Prasahnt Sivarajah 博士の研究チームは、テラヘルツ波<sup>[注 1]</sup>によって超イオン伝導体<sup>[注 2]</sup>内のナトリウムイオンを瞬間的に加速し移動させ、イオン電流として捉えることに成功しました。

テラヘルツ波によって物性変化を誘起する研究では、物質中の電子の状態を変化させるものが大半で、イオンの状態を変化させる研究はごく限られています。これは、イオンの質量が電子の質量に比べて3桁以上大きく<sup>[注 3]</sup>、外場により動かすのが難しいためです。本研究では、二次電池<sup>[注 4]</sup>の材料として使われるなど、イオンが動きやすいことで知られる超イオン伝導体を研究対象として選びました。テラヘルツ波によって1ピコ秒間(1ピコ秒=1兆分の1秒)電場を印加してイオンを動かし、イオンの移動を電流として観測しました。また、テラヘルツ波の透過率変化から、イオンの移動はピコ秒のタイムスケールで完結することがわかりました。

この研究成果は、短時間でのイオンの制御が重要になる「超高速イオニクス」<sup>[注 5]</sup>への第一歩となり、イオンの制御を動作原理とする素子への応用が期待されます。

本研究は2020年4月9日(米国東部標準時)発行の米国物理学会の学術誌「Physical Review Letters」のオンライン版に掲載されます。なお、本研究は、科学研究費補助金(課題番号 17H06124、18H04288、19K03701)、米国国立科学財団(助成金番号 CHE-1665383)の支援のもとに行われました。

## 【研究背景】

電磁波はその周波数によって呼び方が変わり、周波数の高い電磁波を光と呼び、周波数の低い電磁波を電波と呼びます。また、光と電波の中間の周波数域（およそ 100 GHz～10 THz）の電磁波のことをテラヘルツ波と呼びます。位相の揃ったパルス状のテラヘルツ波の発生と検出は容易ではありませんでしたが、近年、フェムト秒レーザー（1 フェムト秒＝1000 兆分の 1 秒）<sup>[註 6]</sup>を用いてテラヘルツ波の発生と検出が可能となりました。1 ピコ秒（1 ピコ秒＝1 兆分の 1 秒）の現象を扱う超高速物理では、テラヘルツ波で物質内の電子を対象としてその応答を制御・観測するという研究が広く行われていますが、イオンを対象としたものは限られています。これはイオンの質量が電子の質量（あるいは、物質内の電子の有効質量）に比べて3～4桁以上大きいことなどから、電子に比べてイオンの方が動かしにくいからです。イオンも超高速物理でより広く研究されれば、イオンの振る舞いの基礎的な知見が得られるばかりでなく、その応用が展開されると考えられます。

## 【研究内容と成果】

物質内のイオンが動くことで電流が流れる物質を固体電解質と呼び、一部の二次電池などのエネルギー貯蔵デバイスなどに用いられています。固体電解質の中でも特にイオンが移動しやすいものを超イオン伝導体と呼びます。本研究グループは、超イオン伝導体の一つであるナトリウム・ベータ・アルミナを研究対象としました。ナトリウム・ベータ・アルミナは最も古くから知られている超イオン伝導体の一つであり、ナトリウム・イオン電池などに用いられています。ナトリウム・ベータ・アルミナでは、ナトリウムイオンがアルミナのスピネルブロックに挟まれた 2 次元層をホッピング移動し、電流となります。2 次元面内のイオン伝導率<sup>[註 7]</sup>は室温で 1 S/m に達し、液体電解質と同等の値となります。本研究グループは、テラヘルツ波によって超イオン伝導体のイオンを大きく揺さぶれば、イオンがエネルギー障壁を越えて移動すると思われました。そして、超イオン伝導体に強いテラヘルツ波を照射しながら電流を計測したところ（図 1）、イオンが移動した証拠となるイオン電流を捉えることに成功しました（図 2）。交流のテラヘルツ波の照射により直流の電流が流れたのは、イオンがテラヘルツ波の電場に対して非線形に応答したためであり、また、一般的な（高時間分解能でない）電流計で電流を捉えることができたのは、イオンが移動し、その移動した先で留まっている証拠となります。さらに、テラヘルツ波の透過率変化から、イオンの移動に要する時間はピコ秒（1 ピコ秒＝1 兆分の 1 秒）のオーダーであることがわかりました。

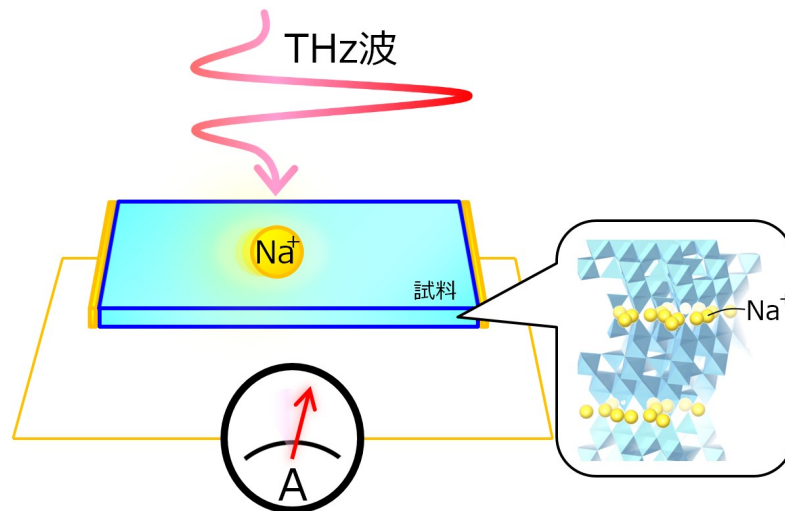


図1 テラヘルツ波を照射して試料(超イオン伝導体)内のイオンを動かして電流にし、それを一般的な電流計で捉えようとする実験の概略図。

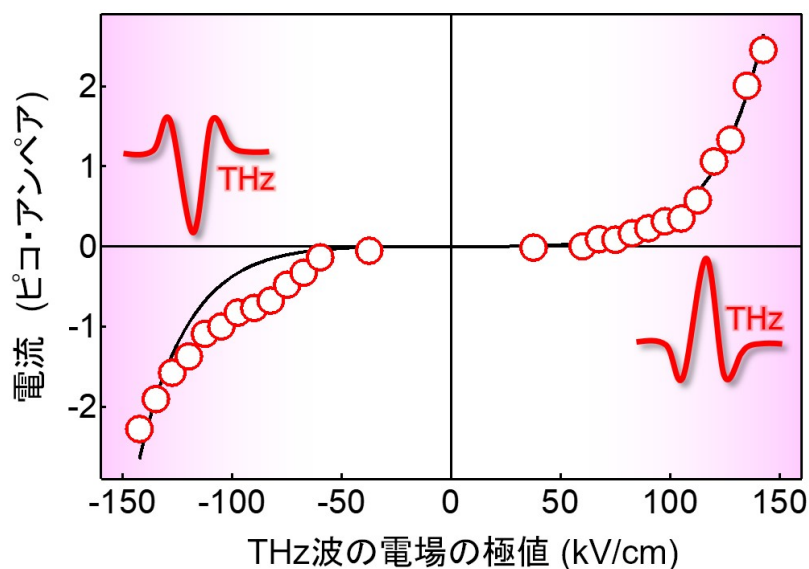


図2 テラヘルツ波の照射によって流れた電流。横軸は照射したテラヘルツ波の電場の強さ、縦軸は流れた電流値を表す。テラヘルツ波の電場の強さ、正負によって電流の大きさ、向きが変化している。

テラヘルツ波を照射するとイオンがエネルギー障壁を乗り越えて移動するメカニズムは厳密には明らかになっていません。しかし、解析結果から、イオンの熱揺動やナトリウムイオン間の反発力が重要な役割を果たしていると考えられます。

### 【今後の展開】

電気素子やデバイスで電子の性質を利用する技術をエレクトロニクスと呼び、半導体を舞台に電子を制御して素子に機能性をもたせるエレクトロニクスは我々

の身の回りに溢れています。電子の高速な制御がエレクトロニクス機器の信号処理の高速化などへ直結するため、日々盛んに研究開発がなされています。一方で、イオンの性質を利用して電気素子を構成する技術(固体)イオニクスと呼び、一部の二次電池などに用いられています。最近では、従来の素子をより小さくし、多彩な機能をもたせようとするイオニクスの研究開発がなされており、エレクトロニクスとともに発展が期待されています。1ピコ秒のタイムスケールでイオンを動かして検出したという本研究は、イオニクスの信号処理の高速化を可能とする「超高速イオニクス」の第一歩となります。

### 【用語説明】

#### [注1] テラヘルツ波

電波や光は電磁波であり、周波数によってその呼び方が異なる。電波と光の中間帯にある周波数約 100 GHz から 10 THz の電磁波をテラヘルツ波と呼ぶ。テラヘルツ波は、バイオ計測、分子計測、物性計測など、研究領域から工業領域までの広い領域で利用されている。

#### [注2] 超イオン伝導体

物質中のイオンが移動して電流を担うものを固体電解質と呼び、その中でも特にイオンの伝導に優れるものを超イオン伝導体、あるいは高イオン伝導体と呼ぶ。超イオン伝導体の電気伝導率は約 0.1 S/m 以上である。

#### [注3] イオンの質量が電子の質量に比べて3桁以上大きい

電子の質量は  $9.1 \times 10^{-31}$  kg である。陽子や中性子の質量はその約 1,840 倍であり、ナトリウム(原子番号 11、原子量 23。)イオンの質量は電子の質量のおよそ 42,000 倍である。

#### [注4] 二次電池

蓄電池、充電式電池のことである。電荷をもったイオンが電極間を行き来することで放電、充電が起こる。使い切りの電池を一次電池と呼ぶ。

#### [注5] イオニクス

電子を制御してスイッチング素子などに応用する分野をエレクトロニクスと呼ぶのに対し、イオンを制御、活用しようとする分野をしばしば固体イオニクス(アイオニクス)と呼ぶ。

[注6] フェムト秒レーザー

パルスレーザーの一種で、パルスの時間幅が 100 fs 程度のものを指す。時間幅が非常に小さいため、高い時間分解能での光計測に用いられる。また、時間的なパルスの圧縮により、レーザー光のエネルギーの尖頭値が非常に高くなることから、物質の様々な光学応答を引き起こすのに用いられる。

[注7] イオン伝導率

電解質など、イオンが電流を担う物質での電気伝導率を指す。電気抵抗率の逆数である。単位は S/m (ジーメンズ毎メートル) である。

**【掲載論文】**

題名: Macroscopic Ionic Flow in a Superionic Conductor Na<sup>+</sup> β-Alumina Driven by Single-Cycle Terahertz Pulses

(単一サイクルのテラヘルツ波パルスで駆動された超イオン伝導体ナトリウム・ベータ・アルミナ内のマクロなイオンの流れ)

著者名: Yasuo Minami, Benjamin Ofori-Okai, Prasahnt Sivarajah, Ikufumi Katayama, Jun Takeda, Keith A. Nelson, and Tohru Suemoto

(南康夫、ベンジャミン・オフォリ・オカイ、プレシャント・シヴァラジャー、片山郁文、武田淳、キース・A・ネルソン、末元徹)

雑誌名: Physical Review Letters

D O I: 10.1103/PhysRevLett.124.147401

お問い合わせ先

<研究に関すること>

機 関 徳島大学 大学院社会産業理工学研究部  
責 任 者 特任准教授 南康夫  
所 在 地 〒770-8506  
徳島県徳島市南常三島町 2 丁目 1 番地  
電話番号 088-656-7671 F A X 088-656-7674  
E-m a i l minami@tokushima-u. ac. jp

<広報に関すること>

機 関 徳島大学  
担 当 常三島事務部 理工学部事務課総務係  
所 在 地 〒770-8506  
徳島県徳島市南常三島町 2 丁目 1 番地  
電話番号 088-656-7304 F A X 088-656-7328  
E-m a i l st\_soumuk@tokushima-u. ac. jp

機 関 横浜国立大学  
担 当 総務企画部学長室広報・渉外係  
所 在 地 〒240-8501  
神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1  
電話番号 045-339-3016 F A X 045-339-3179  
E-m a i l press@ynu. ac. jp

機 関 公益財団法人豊田理化学研究所  
所 在 地 〒480-1192  
愛知県長久手市横道 41 番地の 1  
電話番号 0561-63-6141 F A X 0561-63-6327  
E-m a i l riken@toyotariken. jp