

1. 氏名	土屋 敬志
2. 所属機関	物質・材料研究機構 ナノアーキテクトニクス材料研究センター
3. 研究題目	リチウム及び多価イオン固体電解質における界面分極挙動の定量評価
4. 研究の目的:	<p>本研究の目的は、全固体電池やスーパーキャパシタ等の次世代材料として期待されるリチウムおよび多価イオン伝導性固体電解質において、充放電特性の支配要因である界面分極、すなわち電気二重層効果、および充放電速度を新規手法で定量評価し、高エネルギー密度を有する新規エネルギーデバイスの創製に貢献することである。近年、全固体エネルギーデバイスへの需要が急速に高まっており、リチウム固体電解質のみならず、エネルギー密度の観点から優位性が高い多価イオン固体電解質が多数見つかっている。しかし、伝導イオン種やイオン伝導度についてはよく調べられ確定的である一方、電気二重層効果の多寡についてはほとんどわかっておらず、その重要性に反してブラックボックスとなっている。私は最近、一部のリチウム固体電解質界面の電気二重層効果による分極量を直接的に定量評価する手法の開発に成功した。本研究ではこれを用いて様々な固体電解質界面での電気二重層電荷量、およびその充放電速度を定量評価する。リチウムイオンのみならず多価イオン固体電解質にも応用して電解質や界面ごとの電気二重層電荷量、およびその充放電速度を定量評価し、イオン伝導度に次ぐ次世代エネルギーデバイス開発のガイドラインを得ることを目的とする。</p>
5. 研究の内容:	<p>(1)ホール測定や光電子分光を用いる固体電解質界面の電気二重層効果の解析 (Tsuchiya et al., Commun. Chem. (2021))</p> <p>本研究では固体電解質の特性の内、特に電荷補償の起こりやすさが異なる固体電解質を作成して電気二重層デバイスに用いる。電荷補償の起こりやすさについては、電荷補償が起こりにくい Li-Si-Zr-O (LSZO) 系リチウム伝導体と、Ti の含有により比較的容易に電荷補償が起こることが期待される Li-La-Ti-O (LLTO) 系リチウムイオン伝導体を用いて比較を行った。これらの材料は薄膜化が容易であるため、ダイヤモンド薄膜/ダイヤモンド単結晶上に直接成膜してデバイス作製し種々の評価を行った。その後、硬 X 線光電子分光による固体電解質界面のその場測定も行った。以下に順を追って報告する。</p> <p>LSZO、LLTO、および LLTO/LSZO とダイヤモンドを用いて作成したトランジスタを図 1 に示す。LLTO/LSZO では、LSZO/ダイヤモンド界面に 5nm 厚の LLTO 薄膜を挿入している。これらを用いたホール測定で得られた正孔密度のゲート電圧依存性を図 2 に示す。ゲート電圧の向きはリチウムイオンがダイヤモンド/固体電解質界面からより引き抜かれる向きを正にとっている。ゲート電圧を正の向きに増していくに従い、リチウムと酸素の他にシリコンとジルコニウムを含む LSZO トランジスタでは電気二重層効果によってダイヤモンド表面の正孔密度が $4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ から $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ まで約 3 桁にも渡って変化することに対して、チタンとランタンを含む LLTO トランジスタでは変化が全く観察されなかった。これは LSZO 薄膜界面ではリチウムイオンが引き抜かれるに従い電気二重層効果が生じていることと対照的に、LLTO 薄膜界面では電気二重層効果による正孔密度変化が妨げられていることを示している。さらに、界面に 5nm 厚の LLTO 薄膜を挿入した LLTO/LSZO トランジスタにおいても LLTO トランジスタと同様の非常に小さな変化しか観察されなかった。</p>

これらより、正孔密度変化の挙動が界面から5ナノメートル以内の非常に薄い領域の電解質組成に支配されることが明らかとなった。LSZO トランジスタと、LLTO・LLTO/LSZO トランジスタの顕著な違いは何に起因しているのだろうか？ LSZO トランジスタと LLTO/LSZO トランジスタの間で電荷補償挙動の違いを仮定した模式図を図3に示す。ゲート電圧印加によってダイヤモンド/電解質界面からリチウムイオンが引き抜かれる際に生じる負電荷が、LSZO トランジスタではダイヤモンド表面に新たに導入された正孔と電荷補償するのに対して、LLTO/LSZO トランジスタでは LLTO 薄膜内で構成元素の酸化還元反応により生じた電子欠陥と電荷補償するため、図2(a)の違いが現れるのである。電気二重層の厚さや電位分布を調べるために、硬X線光電子分光によるその場観察を行なった。様々な電圧を印加した状態でその場測定したLSZO 薄膜のO 1s スペクトルを図2(c)に示す。電圧を増すに従ってスペクトル形状が広がっていることがわかる。これは電極/LSZO 界面近傍でのリチウムイオンが引き抜かれ電気二重層が形成されることによって電位分布が生じていることを示している。このスペクトル形状から得られた電位分布の印加電圧依存性を図2(c)に示す。印加電圧が増すに従って、**電極から1nm以内(2~4Å)の非常に薄い領域に急峻な電位分布**が生じていることがわかる。以上より、液体電解質で確認されている Helmholtz 層と類似の電気二重層が固体電解質でも生じ、高密度電荷が蓄積されることを**初めて実験的に実証**した。

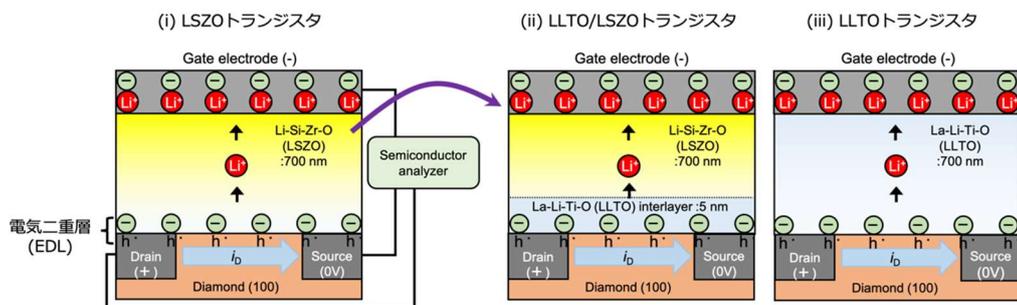


図1. ホール測定で用いた3種類のトランジスタの模式図。

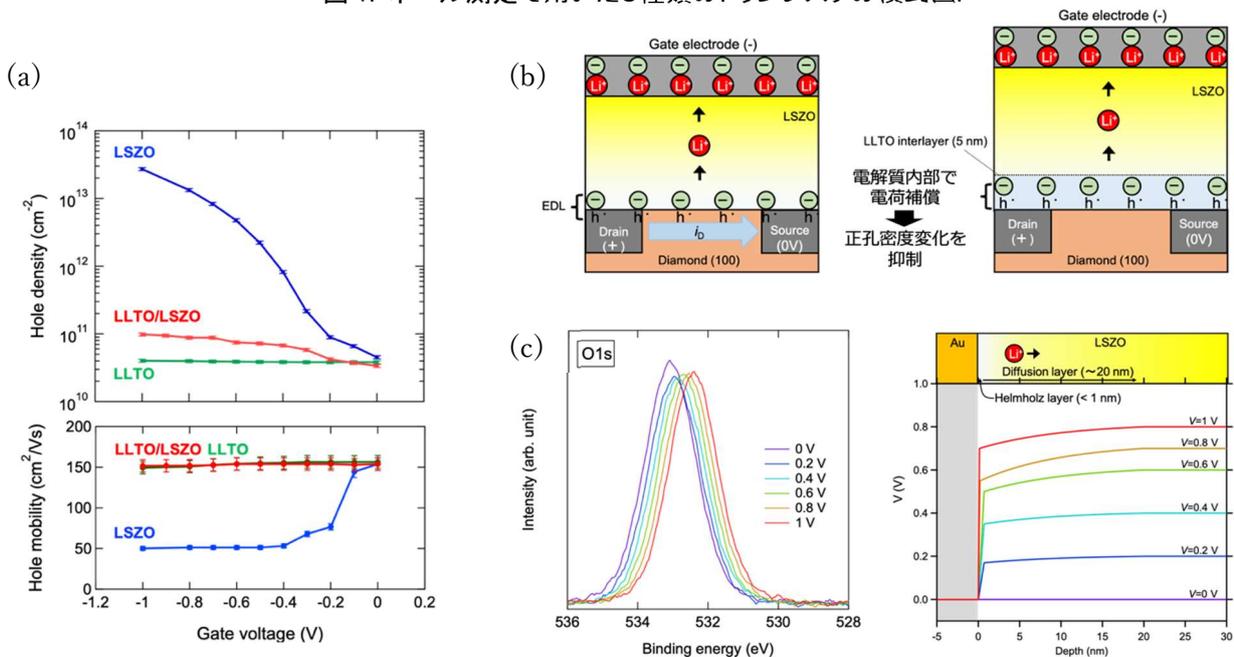


図2. (a)ホール測定で得られた正孔密度のゲート電圧依存性. (b) 電荷補償挙動の違いを仮定した正孔密度変化の抑制メカニズム. (c)光電子分光で得られた電位分布の印加電圧依存性.

(2-1)極薄中間層による充放電速度の高速化(Takayanagi *et al.*, Materials Today Physics (2023))

本研究では、電荷キャリア変調に対する酸化還元効果を排除するために、化学的安定性に優れ、イオンを遮断する性質を持つ H-diamond を半導体のチャンネルに採用し、LiNbO₃ または Li₃PO₄ 中間層を持つ Li-Si-Zr-O 型電気二重層トランジスタ (EDLT) を作製した。作製した EDLT について、リチウム固体電解質/電子材料界面における電気二重層の充放電速度を調べた。その結果、LiNbO₃ および Li₃PO₄ デバイスのいずれにおいても、劇的な充放電速度の変調が観測された。**LiNbO₃/H-diamond 界面では充放電速度が Li-Si-Zr-O よりも1桁以上高速化し、逆に Li₃PO₄/H-diamond 界面では1桁以上減速を引き起こす**ことが明らかとなった。また、図3に示す LiNbO₃ デバイスのパルス応答測定結果から、LiNbO₃/H-diamond 界面の**充放電速度の高速化はたった1 Å 厚の挿入でも起きる**ことがわかった。この結果は、高濃度のイオンが与えられた層によって、液体電解質系に匹敵する EDL 効果をもたらされ、電気二重層容量と電極表面の電荷を決定する界面からわずか数 Å のところにある固体/固体電解質界面領域が原因であることを示している。

が Li-Si-Zr-O よりも1桁以上高速化し、逆に Li₃PO₄/H-diamond 界面では1桁以上減速を引き起こすことが明らかとなった。

また、図3に示す LiNbO₃ デバイスのパルス応答測定結果から、LiNbO₃/H-diamond 界面の**充放電速度の高速化はたった1 Å 厚の挿入でも起きる**ことがわかった。この結果は、高濃度のイオンが与えられた層によって、液体電解質系に匹敵する EDL 効果をもたらされ、電気二重層容量と電極表面の電荷を決定する界面からわずか数 Å のところにある固体/固体電解質界面領域が原因であることを示している。

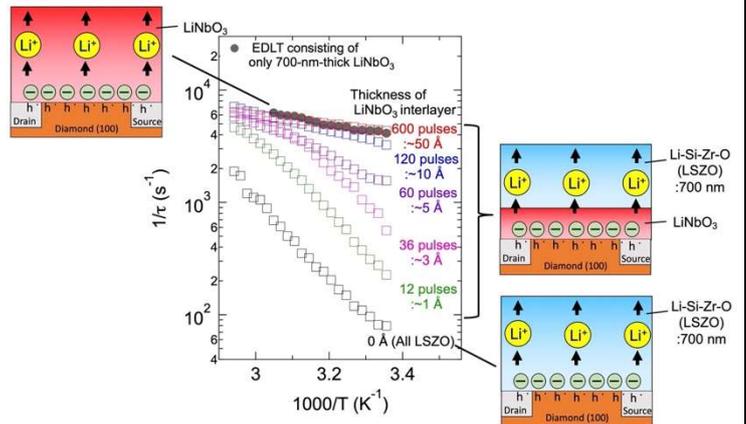


図3. 1 Å ~5nm 厚の中間層挿入による充放電速度の変化.

(2-2)水素イオン固体電解質における電気二重層の最高充放電速度(Takayanagi *et al.*, Materials Today Advances (2023))

本研究では、多孔質イットリア安定化ジルコニア膜 (YSZ) /ダイヤモンド界面での電気二重層効果を利用し、高速動作する EDLT を開発した[図4(a)]。電気二重層の充放電速度は、イオン伝導度が高まる程、また電解質層の厚さが薄くなる程、高速化することが理論的に示されている。本研究ではパルスレーザー堆積法で成膜条件を精密に調整することで多量のナノ細孔を YSZ 膜に導入することに成功した。得られた薄膜は、ナノ細孔内の吸着水により高い水素イオン伝導性を示すため、電気二重層の充放電速度の高速化が期待できる。パルス電圧印加により動作速度(時定数)を調査したところ、27マイクロ秒だった。これは典型的な電気二重層トランジスタよりも370倍高速であり、従来のチャンピオンデータ(229マイクロ秒)と比較しても8.5倍と**世界最高速度を達成**した[図4(b)]。

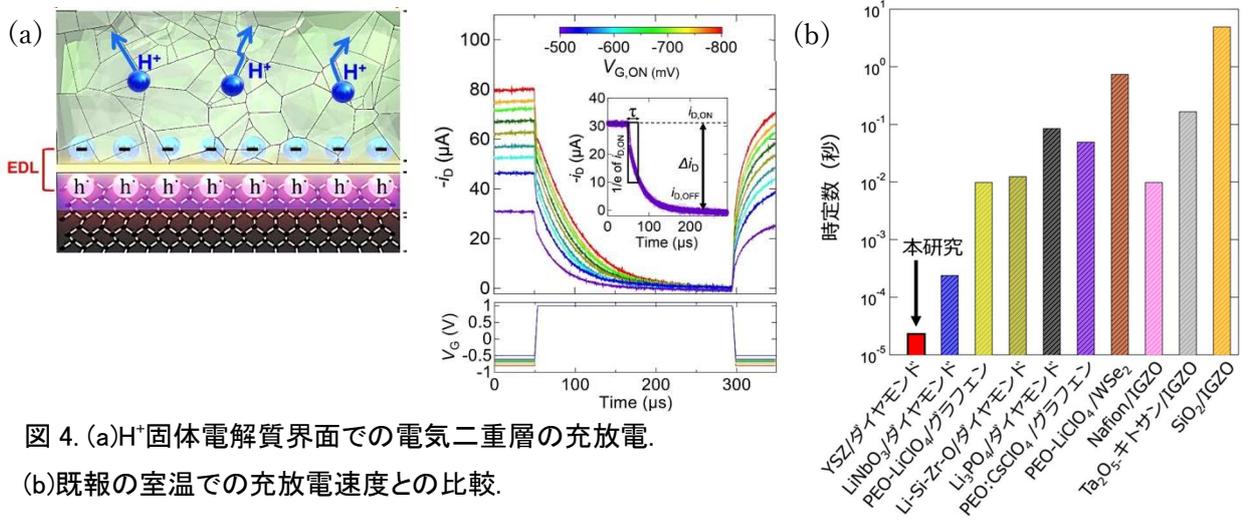


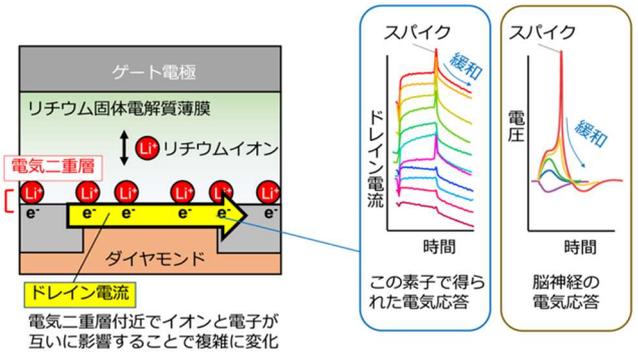
図4. (a)H⁺固体電解質界面での電気二重層の充放電.

(b)既報の室温での充放電速度との比較.

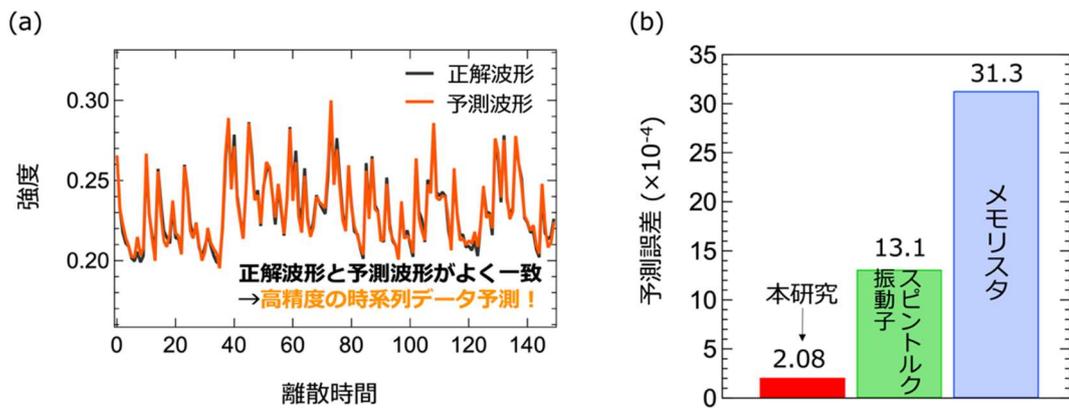
(3)固体電解質界面の電気二重層の電気応答を利用する高性能な脳型情報処理 (Nishioka *et al.*, Science Advances (2022))

我々は、リチウム固体電解質（ジルコニウムをドーブしたケイ酸リチウム）薄膜とダイヤモンド単結晶を積層した界面近傍のイオンと電子の振舞いを利用して「カオスの縁」状態を発現させ、高い情報処理機能を示す小型素子を開発した（図 5）。この素子は固体電解質/ダイヤモンド界面に形成される電気二重層の充放電によってダイヤモンド表面の電子キャリア密度が変化することで電気抵抗が変化する電気二重層トランジスタの原理で動作する。この素子に、情報処理が必要な時系列データを電圧パルス列として入力すると、先述の電気二重層の充放電によってダイヤモンド表面を流れる電流が刻一刻と変化する。この際、リチウムイオンと電子の輸送がお互いに影響を及ぼし合って複雑に振舞い、無数のニューロンが互いにフィードバックしあう脳神経に近い状況が生まれる。実際に、脳神経の電気応答に見られる様なスパイクや緩和を伴う、複雑・多様な電気応答を出力することがわかった（図 5）。そこで我々はこの素子を「物理リザーバ」に用い、情報処理に応用した（物理リザーバコンピューティング）。物理リザーバコンピューティングとはニューロモルフィックコンピューティングの一種であり、「物理リザーバ」に信号を入力し、「物理リザーバ」内部での信号変化を利用して情報処理を行う手法である。深層学習を含む一般的な階層型ニューラルネットワークよりも低い計算コスト（消費電力）で情報処理することが原理的に可能だが、高性能を得るためには優れた性能を持つ物理リザーバが要求される。本研究で開発した素子は、イオンゲーティング（イオンを用いてトランジスタを動作させること）によって物理リザーバの機能を果たすことから、イオンゲーティングリザーバと名付けた。

この素子の情報処理性能を、物理リザーバコンピューティングの性能試験に用いられる二次非線形変換タスクで評価した（図 6）。予測誤差を評価したところ、 2.08×10^{-4} という非常に小さな値（高い予測精度）が得られた。これは、スピントルク振動子やメモリスタを用いた報告よりも数倍から1桁程度高い精度であり、**小型素子の中で世界最高性能**だった。こうした高性能の起源を探るべく電気応答を詳しく調べたところ、**人間の脳の高効率性の起源である「カオスの縁」状態**にあることがわかった。



この素子の情報処理性能を、物理リザーバコンピューティングの性能試験に用いられる二次非線形変換タスクで評価した（図 6）。予測誤差を評価したところ、 2.08×10^{-4} という非常に小さな値（高い予測精度）が得られた。これは、スピントルク振動子やメモリスタを用いた報告よりも数倍から1桁程度高い精度であり、**小型素子の中で世界最高性能**だった。こうした高性能の起源を探るべく電気応答を詳しく調べたところ、**人間の脳の高効率性の起源である「カオスの縁」状態**にあることがわかった。



6. 研究の成果と結論、今後の課題:

本研究によって明らかとなったのは、まず**(1)固体電解質の中に、電気二重層効果を示すもの、示さないものが存在し、示すものの中でも効果(静電容量)の大きさに幅がある**ということである。固体電解質の電気二重層については、存在そのものが疑われている状況であったが、本研究により存在が証明され、さらにその大きさが材料の種類によってオーダーで異なるという重要な知見が得られた(Tsuchiya *et al.*, Commun. Chem. (2021))。次に、**(2)電気二重層の充放電速度が電極界面近傍 1 nm 以内の化学組成によって数桁に渡り制御・増強可能**であることである。電気二重層について理解が進んでいる液体電解質系の電気化学では、電気二重層の充放電速度が電解質バルクのイオン伝導度に支配されると考えられている。これを固体電解質系に援用すると、充放電速度は固体電解質バルクのイオン伝導度に支配されると想定されるが、本研究ではこれと大きく異なり、むしろ界面に強く依存するという知見が得られた。本研究において、**電極材料を固定して固体電解質材料を変更するのみで、最大3桁もの充放電速度の増強**が観察された (Takayanagi *et al.*, Materials Today. Physics (2023)、 Takayanagi *et al.*, Materials Today Advances (2023))。固体電解質を用いるエネルギーデバイスの開発方針に重大な影響を与える成果・結論である。もう一つは、**(3)固体電解質トランジスタの電気応答に強い非線形性が含まれ、これを利用して高性能の情報処理が可能**であることである。リチウム固体電解質界面の電気二重層の充放電応答の特徴に、人間の脳神経回路と類似の「カオスの縁」状態が認められ、これを情報処理を用いることで**世界最高性能の小型情報処理デバイス**として機能した (Nishioka *et al.*, Science Advances. (2022)、Wada *et al.*, Advanced Intelligent Systems. (2023))。当初想定しなかった展開であるが、本助成研究によって固体電解質界面の電気応答を詳細に調査した過程で発見につながったものである。近年、機械学習が急速に発展し、あらゆる社会活動の様式を劇的に変化させつつある一方、機械学習で消費される膨大な電力や温室効果ガス排出量が深刻な社会問題となっている。本研究で得られた高性能デバイスはこれらの解決に向けて応用が期待される重大な成果である。

本助成研究によって、リチウムイオン、水素イオンといった**1価イオンの固体電解質界面について多くの重要な研究成果**が得られた。一方、**2価以上の多価イオン固体電解質の研究については、いまだ道半ば**である。これは、トランジスタに使用しているダイヤモンド単結晶表面の終端水素が熱に弱く、多価イオン固体電解質と接触した界面を形成するための高温成膜ができないからである。これを克服するために、耐熱性が高い別の半導体材料をトランジスタのチャネルとして利用する検討を行なってきた。この新しい半導体材料とリチウム固体電解質の組み合わせでは良好なトランジスタ動作を既に確認できており、現在、これを用いた多価イオン固体電解質の高温成膜、および作製したトランジスタを用いた界面分極挙動を調べる実験に取り組んでいるところである。残念ながら助成期間中に多価イオン固体電解質の界面分極挙動まで調査し論文化することはできなかったものの、1年以内には論文化できる見込みである。

7. 成果の価値

7.1_学術的価値:

本研究によって得られた極めて重要な結論、それは、電気二重層の**充放電速度が界面近傍 1 nm 以内の化学組成によって数桁に渡り制御・増強可能**であることである。電気二重層の充放電速度が電解質バルクのイオン伝導度に支配されると考えてきた、**従来の電気化学を根底から覆す発見**である。エネルギーデバイスの研究開発における電極/電解質界面の描像の刷新を促す独創的な研究成果であり、論文の受賞、および International Society for Solid State Ionics(国際固体イオニクス学会)、電気化学会などの主要学会での講演賞などにより高く評価されている。トランジスタ構造を利用したホール測定、およびパルス応答測定によって固体電解質界面の特徴を調べる本手法は、固体電池の電極界面、コート層などの精密解析への応用が期待される。

7.2_社会的価値:

本研究の応用によって、電気二重層キャパシタや固体電池といった固体電解質を利用するエネルギーデバイスの**充放電速度を劇的に向上**することが可能となる。従来、場当たりのに行われてきた充放電速度を高くするための電解質界面設計を、本研究で確立した電気二重層解析法によって、系統的かつ精密に行うことが可能となった。**界面での充放電速度を数桁に渡って制御**することで、電極材料、および固体電解質材料が本来有している高い出力性能を引き出せるようになるため、こうしたエネルギーデバイスの高出力化によって**エネルギー問題、および温室効果ガス排出問題の解決に大きく貢献**できる。また、副次的に見つかった情報処理デバイスも、**機械学習の低消費電力化**に貢献できる。

7.3_研究成果:

・「研究論文(原著)」

1. M. Takayanagi, D. Nishioka, T. Tsuchiya*, M. Imura, Y. Koide, T. Higuchi, K. Terabe. Ultrafast-switching of an all-solid-state electric double layer transistor with a porous yttria-stabilized zirconia proton conductor and the application to neuromorphic computing. *Materials Today Advances*. 18 (2023) 100393
2. M. Takayanagi, T. Tsuchiya*, D. Nishioka, M. Imura, Y. Koide, T. Higuchi, K. Terabe. Accelerated/decelerated dynamics of the electric double layer at hydrogen-terminated diamond/Li⁺ solid electrolyte interface. *Materials Today Physics*. 31 (2023) 101006
3. T. Wada, D. Nishioka, W. Namiki, T. Tsuchiya*, T. Higuchi, K. Terabe, A Redox-Based Ion-Gating Reservoir, Utilizing Double Reservoir States in Drain and Gate Nonlinear Responses. *Adv. Intell. Syst.* 2300123(2023)
4. D. Nishioka, T. Tsuchiya*, W. Namiki, M. Takayanagi, M. Imura, Y. Koide, T. Higuchi, K. Terabe. Edge-of-chaos learning achieved by ion-electron-coupled dynamics in an ion-gating reservoir. *Science Advances*. 8, eade1156 (2022)
5. T. Wada, W. Namiki, T. Tsuchiya*, D. Kan, Y. Shimakawa, T. Higuchi, K. Terabe. In situ manipulation of perpendicular magnetic anisotropy in half-metallic NiCo₂O₄ thin film by proton insertion. *Japanese Journal of Applied Physics*. 61, SM1002 (2022)
6. OT. Tsuchiya*, M. Takayanagi, K. Mitsuishi, M. Imura, S. Ueda, Y. Koide, T. Higuchi, K. Terabe. The electric double layer effect and its strong suppression at Li⁺ solid electrolyte/hydrogenated diamond interfaces. *Communications Chemistry*. 4, 117 (2021).

・「国際会議発表」

1. [T. Tsuchiya*](#). Ion and Electron Dynamics at Semiconductor/Solid Electrolyte Interfaces and the Application to Neuromorphic Computing. ICMAT 2023 Post Symposium Interface Ionics for All-Solid-State Batteries. (招待)
2. [T. Tsuchiya*](#), D. Nishioka, W. Namiki, M. Takayanagi, M. Imura, Y. Koide, T. Higuchi, K. Terabe. Ion-gating Reservoir for Time-series Pattern Recognition and Prediction Tasks. The International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT) 2023
3. [T. Tsuchiya*](#), D. Nishioka, W. Namiki, M. Takayanagi, M. Imura, Y. Koide, T. Higuchi, K. Terabe. Edge-Of-Chaos Learning Achieved by Ion-Electron Coupled Dynamics in an Ion-Gating Reservoir. WPI-MANA INTERNATIONAL SYMPOSIUM 2022. 2022
4. K. Terabe, [T. Tsuchiya](#), T. Tsuruoka. Ionic nanoarchitectonics for a variety of performance, such as neuromorphic devices. WPI-MANA INTERNATIONAL SYMPOSIUM 2022. 2022
5. K. Terabe, [T. Tsuchiya](#), T. Tsuruoka. Novel-concept functional devices achieved by versatile ion nanoarchitectonics.. MEMRISYS2022 (The 5th International Conference on Memristive Materials, Devices & Systems). 2022
6. Y. Yamaguchi, W. Namiki, D. Nishioka, [T. Tsuchiya*](#), T. Higuchi, K. Terabe. Visible light switching enhanced high dimensionality in spin wave interference-based reservoir computing. 35th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2022). 2022
7. W. Namiki, Y. Yamaguchi, D. Nishioka, [T. Tsuchiya*](#), T. Higuchi, K. Terabe. High performance reservoir computing with interfered spin wave multi-detection. 35th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2022). 2022
8. K. Terabe, [T. Tsuchiya](#), T. Tsuruoka. Various functional devices based on ionic nanoarchitectonics, enhancing electronic computing.. The IEEE Advanced School on “Nanotechnology-based Computing” (ASNC) . 2022
9. D. Nishioka, [T. Tsuchiya*](#), W. Namiki, M. Takayanagi, M. Imura, Y. Koide, T. Higuchi, K. Terabe. Physical Reservoir Computing Based on Solid-State Electric Double Layer Effect. 23rd International Conference on Solid State Ionics. 2022
10. T. Wada, W. Namiki, [T. Tsuchiya*](#), D. Kan, Y. Shimakawa, T. Higuchi, K. Terabe. All-Solid-State Redox Transistor for In Situ Manipulation of Perpendicular Magnetic Anisotropy in Half-Metallic NiCo₂O₄ Thin Film. 23rd International Conference on Solid State Ionics (SSI-23). 2022
11. [T. Tsuchiya*](#), K. Terabe. Exploring Novel Functions at Solid/Solid Electrolyte Interfaces for Application to Neuromorphic Computing. 23rd International Conference on Solid State Ionics (SSI-23). 2022(招待)
12. [T. Tsuchiya*](#), K. Terabe. Exploring novel functions at solid/solid electrolyte interfaces for neuromorphic applications. MEMRISYS 2021. 2021(招待)
13. [T. Tsuchiya*](#), K. Terabe. Ionic nanoarchitectonics for physical property tuning and information processing. WPI-MANA Virtual City of Workshops TIA “Kakehashi” on Organic/Inorganic Spin Electronics Research.
14. M. Takayanagi, [T. Tsuchiya*](#), K. Mitsuishi, M. Imura, S. Ueda, Y. Koide, T. Higuchi, K. Terabe. The Electric Double Layer Effect and its Strong Suppression in Li⁺ Solid Electrolyte-based Transistors. MEMRISYS

15. W. Namiki, T. Tsuchiya*, M. Takayanagi, T. Higuchi, K. Terabe. In situ Manipulation of Magnetic Anisotropy in Magnetite Thin Film, Achieved with an All-solid-state Redox Device. MEMRISYS 2021. 2021
16. R. Nur, T. Tsuchiya, K. Toprasertpong, K. Terabe, S. Takagi, M. Takenaka. Ferroelectric HfO₂-Based Monolayer MoS₂ Optical Synaptic Transistor for Neuromorphic Vision Systems. MEMRISYS 2021. 2021
17. T. Wada, W. Namiki, T. Tsuchiya*, D. Kan, Y. Shimakawa, T. Higuchi, K. Terabe. In situ Manipulation of Perpendicular Magnetic Anisotropy in Half-metallic NiCo₂O₄ Thin Film by Proton Insertion. MEMRISYS 2021. 2021
18. K. Terabe, T. Tsuchiya*, T. Tsuruoka. Ionic Nanoarchitectonics for Exploring Memristive Characteristics. MEMRISYS2021 (4th International Conference on Memristive Materials, Devices & Systems). 2021
19. T. Tsuchiya*, T. Tsuruoka. K. Terabe. Ionic Nanoarchitectonics for Information Storage, Neuromorphic and Decision Making Functionalities. MANA International Symposium 2021 jointly with ICYS. 2021 (招待)

・「受賞」

1. The 23rd International Conference on Solid State Ionics (SSI-23) Excellent poster presentation award. D. Nishioka, T. Tsuchiya*, W. Namiki, M. Takayanagi, T. Higuchi, K. Terabe. Physical Reservoir Computing Based on Solid-State Electric Double Layer Effect.
2. Japanese Journal of Applied Physics Highlights of 2022. T. Wada, W. Namiki, T. Tsuchiya*, D. Kan, Y. Shimakawa, T. Higuchi, K. Terabe. In situ manipulation of perpendicular magnetic anisotropy in half-metallic NiCo₂O₄ thin film by proton insertion. Japanese Journal of Applied Physics. 61, SM1002 (2022)
3. Applied Physics Express 2021 Outstanding Reviewer Awards. T. Tsuchiya
4. 電気化学会第 89 回大会 優秀学生講演賞 高柳真、土屋敬志*、小倉弓枝、間嶋拓也、上田茂典、樋口透、寺部 一弥. 種々のリチウム系固体電解質/電極界面における酸素授受挙動の in-situ 観察
5. Communications Chemistry 2021 Editors' Highlights. T. Tsuchiya*, M. Takayanagi, K. Mitsuishi, M. Imura, S. Ueda, Y. Koide, T. Higuchi, K. Terabe. The electric double layer effect and its strong suppression at Li⁺ solid electrolyte/hydrogenated diamond interfaces. Communications Chemistry. 4, 117 (2021).
6. 新学術領域「蓄電固体界面科学」若手勉強会優秀発表賞 高柳真、土屋敬志*、小倉弓枝、間嶋拓也、上田茂典、樋口透、寺部 一弥. 種々のリチウム系固体電解質/電極界面における酸素授受挙動のその場観察
7. MEMRISYS 2021 Excellent poster presentation award. M. Takayanagi, T. Tsuchiya*, K. Mitsuishi, M. Imura, S. Ueda, Y. Koide, T. Higuchi, K. Terabe. The Electric Double Layer Effect and its Strong Suppression in Li⁺ Solid Electrolyte-based Transistors.
8. MANA International Symposium 2021 Excellent Poster Presentation Award. W. Namiki, T. Tsuchiya*, M. Takayanagi, T. Higuchi, K. Terabe. Room-Temperature Manipulation of Magnetization Direction in Magnetite, Achieved with an All-Solid-State Redox Transistor.

・「マスコミ報道」

1. 「固体-固体電解質界面 電気二重層容量を簡単測定」日刊工業新聞 2023 年 3 月 8 日
2. 「物材機構と東京理科大、脳神経模したイオニクス素子開発 人工脳の実現目指す」日刊工業新聞 2022 年 12 月 27 日
3. 「全固体電池の出力低下 原因探る新手法 東京理科大など」化学工業日報 2021 年 8 月 25 日