

電波発電を目指したレクテナ用昇圧素子の開発

早稲田大学先進理工学部 電気・情報生命工学科 教授

柳谷隆彦

ワイヤレス給電によりカメラやセンサを駆動できれば、バーチャル空間の創生など、新たな社会構造が期待される。例えば、配線や電池交換が必要なければ、大量のライブカメラを設置することが可能となり、Google mapを動画にするようなこともできるかもしれない。しかし現在、これらデバイス駆動のエネルギー源（電源）を周囲環境から取得する決めの技術がなく、バーチャル空間実現のボトルネックとなっている。ここで、空間の電磁波からエネルギーを取得することを考えてみる。この二十年で通信用周波数バンドの数は何倍にも増加し、環境の電磁波エネルギー密度は年々増加している。図1に移動体通信のGHz帯における周波数バンドの変遷を示す。もちろん現在の電磁波密度ではカメラやスマホの駆動には全く不十分ではあるが、近未来の高い電磁波密度ではそうとも言い切れない。

そこで、柳谷研究室では、数十年先の将来を見越して無線給電デバイスについて研究を行っている。具体的には、独自の結晶方位制御技術を用いてGHz帯の新しい3次元圧電薄膜構造を開発し、無線給電用のアンテナ整流器への応用を目指している

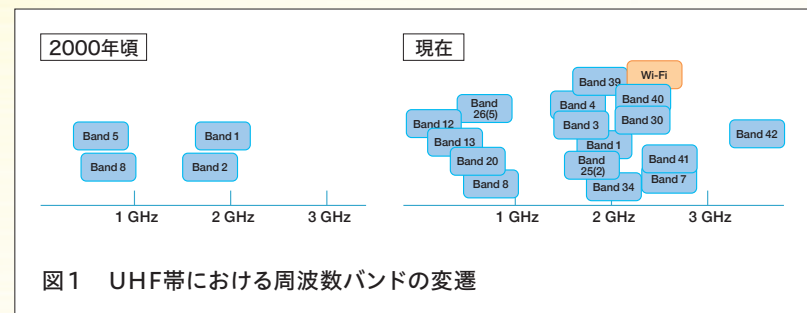


図1 UHF帯における周波数バンドの変遷

[1-4]。近い将来においても、6G規格の立ち上げ、自動運転車用の無線通信や、人工密集地における新たな近距離無線通信の急激な普及が予想されており、さらなるエネルギー密度の増大が見込まれている。

一般的に電波から直流電圧への変換において、その効率はダイオードにしきい電圧がかかる際に、最大となることが知られている。しかしながら、一般的な都会の電波環境においても電磁波強度は微弱であり、効率を引き出すことは難しい。そこで、電波の振幅を増幅するためにDickson charge pumpなどの昇圧回路が良く用いられる。しかし、昇圧回路にはGHz帯での効率低下やインピーダンス不整合、大型化の問題がある。これに対して、研究室で新たに提案している圧電薄膜を用いたGHz帯の昇圧素子は、数ミリ角程度の小型の素子を用いて、高効率で入力電磁波を昇圧できる。

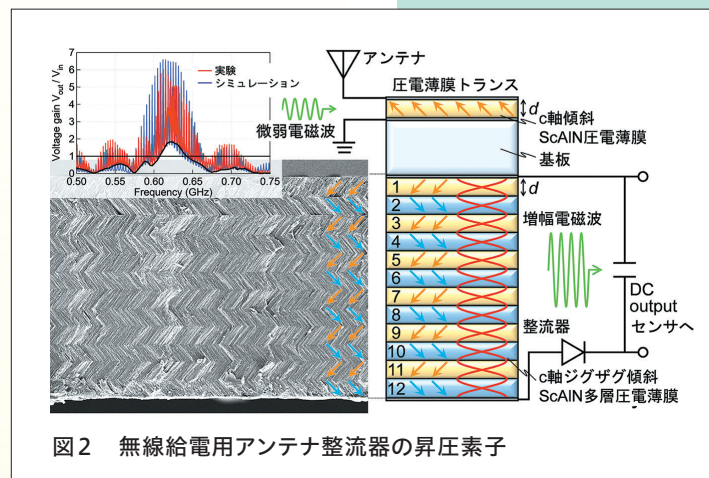


図2 無線給電用アンテナ整流器の昇圧素子

- [1] S. Kinoshita and T. Yanagitani, "Theoretical and experimental study of shear mode bulk acoustic wave transformer based on c-axis zigzag ScAlN multilayer for rectenna application," *Appl. Phys. Lett.*, 118, 142903, (2021).
- [2] S. Kinoshita and T. Yanagitani, "Bulk acoustic wave transformer based on the combination of the high-ε epitaxial PbTiO₃ and low-ε ScAlN thin films," *Appl. Phys. Express*, 118, (2021).
- [3] S. Kinoshita, H. Kishi, K. Izumi and T. Yanagitani, "GHz voltage amplification in a stack of piezoelectric ScAlN and non-piezoelectric SiO₂ layers," *Appl. Phys. Express* 17 116501 (2024).
- [4] S. Kinoshita, R. Karasawa, Y. Shimano, M. Matsumura, and T. Yanagitani "Zig-zag ScAlN 12-layer for shear mode BAW transformer application in rectenna," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Contr.* (2025) (in press).



早稲田大学先進理工学部
電気・情報生命工学科 教授

大久保 将史

Masashi Okubo

■profile■

2000年東京大学教養学部基礎科学科卒業、2005年同大学大学院総合文化研究科広域科学専攻博士課程修了（博士（学術））、2005年Universite Pierre et Marie Curie博士研究員、2006年産業技術総合研究所博士研究員、2007年中央大学理工学部助教、2009年産業技術総合研究所研究員、主任研究員、2014年東京大学大学院工学系研究科准教授、2021年～早稲田大学先進理工学部電気・情報生命工学科教授

電気系と化学系、サイエンスとエンジニアリングの双方向から 新しい時代の、新しい電池のアイデアと材料を創出する

持続可能な社会で安全・安価な電力供給を担う電池やキャパシタの研究・開発を行っている大久保研究室。
より効率的、長時間、安全な夢の蓄電デバイスの実現を目指す。

リチウムイオン電池に換わる電池のアイデアと 材料を開発

—— 今や電池は様々な電子デバイスや電気自動車（EV）に組み入れられており、大久保研究室の研究テーマは世界中で最もホットな課題の一つと言えるのではないのでしょうか。どのような内容で電池の研究開発に取り組んでいるのでしょうか。

電池の内部にはいろいろな部材が入っています。主に二次電池を対象として、その部材に新しい材料を使うことで電池の特性を上げたり、違う元素で構成された部材に置き換えたりするなど、トータルとしての電池の性能を上げていく研究開発をしています。

充電と放電の両方ができる電池を二次電池と呼び、現在、世界中で使われるほとんどの二次電池としてリチウムイオン電池（LIB）が使われています。しかし、同時に多くの課題も抱えているのです。リチウムやコバルトが希少な元素ゆえに資源持続性に問題があり、地球上に偏在していることから政治的問題にもなりえます。また、EVやモバイルバッテリーが爆発したといったニュースが度々報じられるなど、安全性にも問題があります。

別の側面から見ると、LIBはエネルギー密度と出力密度が高いという理由から普及してきたのですが、現在の性能ではまだ課題が残ります。エネルギー密度というのは蓄電可能な電力量のことで、出力密度とはどれくらいのスピードでエネルギーを供給・蓄電できるかということ。わかりやすい例として、EVではフル充電で3時間かかって走行距離が400kmというのが標準のところ、1回の充電が20分で済み走行距離も1000kmとなれば利便性が格段に上がります。他の例では、太陽光や風力で作った電気が全部蓄電できるようになればエネルギー政策も大きく変わってきます。

我々研究室のテーマの一つに、リチウムの代替として、資源的な制約のないナトリウムを使ったナトリウムイオン電池や水を使ったアクア電池などの開発があります。周期表で見ると、Liの下がNaで上がHですから性質が似ているのです。

—— ナトリウムイオン電池やアクア電池は実用化されているのでしょうか。

ナトリウムイオン電池は、日本が2009年に世界で初めて安定的な充放電に成功し、以降、韓国や中国にも開発競争が広がっていきました。近年、中国が市販化を始めましたが、まだパイロット版といったところです。水は電池200年の歴史の中で古くから使われた材料ですし、現在では蓄電池ほか、ハイブリッド車に搭載されるニッケル水素電池にも使われています。LIBが時々爆発を起こすのは、内部の電解液が可燃性であるためで、その点、水は燃えないので安全です。

とはいえ、新たな二次電池がすぐにLIBに置き換わるというわけではなく、逆に言えば、今の我々にはLIBしか選択肢がないことがLIBの最大の問題点でもあるのです。LIBが登場して30年、もはや枯れた技術ともいえるのですが、LIBの代替と期待される電池が、進化する社会ニーズに追いついていないというのが実情です。ただし、選択肢はあるべきで、LIBとナトリウムイオン電池、LIBとアクア電池との組み合わせはあってもいいと思います。つまり、LIBよりも部分的に優れた性能を持つ二次電池が必要。そこから始まって、LIBに置き換わる電池が実用化されていくという流れになると思います。

—— 大久保研究室の近年の成果で話題性の大きかったものはありますか。

全固体電池において効果的な材料の開発です。電解質が液体ではなく固体でできた全固体電池は高性能と安全性に優れた蓄電デバイスなのですが、イオンが動き回ると電解質の部材が膨張・収縮し、さらに割れが生じれば絶縁状態になるという問題があります。今の技術だと、重い治具などで物理的に押し付け、圧力をかけて防いでいるのですが、これを不要とする材料、つまり、イオンが動いても膨張・収縮をしない材料であるMXene（マキシン）という層状化合物を開発し、2024年にプレスリリースしました。

元々、MXeneは電気化学キャパシタの材料として開発しました。二次電池が電力エネルギーを化学エネルギーに変換し高密度に貯蔵する原理であ



レドックスフロー電池の充放電試験

るのに対し、キャパシタは化学反応ではなく物理吸着によって電気二重層で電力エネルギーを貯蔵しており、構造変化はほぼ起こりません。この材料として10年ほど研究してきたMXeneを全固体電池に応用したわけです。

ほか、ナトリウムイオン電池の負極側の材料が反応電圧が低くて安全性が担保できないという問題に対し、電圧が高くなる負極材料の開発を企業と組んで進めています。

「匠の技」とAIの融合が進められている

——大久保研究室のテーマの文言に「電気と電子と情報が融合」とありますが、情報を加えた意図は何でしょうか。

研究開発では、どうやって材料を見つけるかが研究者の腕の見せ所です。しかし、材料の発見を優れた研究者のみによる「匠のワザ」に任せるのではなく、普通の研究者でもできるように情報科学でやりましょう、という意味です。

今は国のプロジェクトからも「実験のデータは全部とっておいてください」と言われます。大学、研究機関、企業の研究所など各研究所で発生した情報——誰が、どういう組成で、どんなプロセスで作ったのか、その特性はどうか、などをすべて保存しておいて、それをデータセンターに集め、さらにAIで機械学習させて「匠のワザ」を抽出するという取り組みが進められているのです。そのためにはロボットによる実験・評価も求められます。情報は一つのラボだけのものではなく、データをたくさんつくる・残すというのが大切なですね。

——大久保研究室では、研究内容からして企業とのタイアップも多くなると思いますが。

常に複数の企業と複数のテーマで共同研究しています。もっとも、我々と企業の人とは求めるものが違います。たとえば、我々は「1分で充電と放電ができたから素晴らしい」となりますが、企業は「ではそれ以外の性能はどうだ」と考える。あるいは、我々は「ラボで100回・200回の充放電が繰り返しできたから安定」となるけど、企業では「1万回・10万回で大丈夫か」になってくる。もちろん、大学では1万回もやってられないので、そこに企業と組むメリットがあると思います。

——電池の材料開発を超えた視野はありますか。

すでに何人かの早稲田の先生と一緒に、LIBのリサイクル問題に取り組んでいます。EVが普及して何年も経っており、経年劣化したLIBをどうするかが世界的な課題になっています。これまでのLIBの開発者はリサイクルをほとんど考えてこなかったし、そもそもLIB自体の解体も難しい。これからはリサイクルしやすい電池が課題になる中で、部材としてもリサイクルしやすい材料が求められるの

ではないでしょうか。もちろん、性能は落とさずに。これには産業全体を巻き込んだ包括的な仕組みづくりが必要となるでしょう。

電気系と化学系の両面で電池を研究開発するのが研究室の特徴

——先生はいつ頃から電池の研究に取り組まれたのでしょうか。

学部からドクターまでとフランスでのポスドクでは磁性材料をやっていた、その後、産業技術総合研究所に移ってから電池の研究を始めました。つまり、化学系から電池に入ったのです。その私が今、電気系の学科で学生たちに教えているというのは、電池のステージが上がってきたからだと思います。

電池は化学系のメーカーが作ってきましたが、電池が大規模になり、再生可能エネルギーなどの電力系システムに組み入れられるようになった。しかし、電気系の人にとって電池の外側に当たる電圧とか出力とかはわかっても、内側、たとえば電解質が枯れて突然死する、といったことがわからない。そこで、ウェットケミストリーの電池をどうやって社会に融合させていくのかが大きな課題になってきたのだと思います。

——大久保研究室にはどんな特徴があるのでしょうか。

大学での電池の研究室というのはおよそ化学系ですが、電気工学の知識も非常に重要です。出力を上げるというのは電気系で、そのための材料や構成に関しては化学系です。うちの学生はその両方をやっているの、企業からも高い評価をいただいています。

また、研究の進め方として、電池の開発には国と企業のサポートがかなり入っていて、企業などからのプロジェクトがあれば、学生にもそのテーマに合わせて従事してもらうことになります。その意味で、自分の好きな課題をとことん追究するというより、進捗管理が大切になってきます。

——学生たちに望むことはありますか。

繰り返しになりますが、電池の研究はプロジェクトとか企業との合同とかが多く、サイエンスよりもエンジニアリングの要素が強くなります。性能を上げる意味でエンジニアリングは妥協できませんが、それだけでは面白くないので、誰もやったことのないプロセス、組成、材料など、何か面白いことを見つけていくように指導しているつもりです。

私の研究室は電気系ですが、早稲田内には応用化学、環境資源などの面から電池に取り組んでいる研究室もあります。そちらと連携しながら、いずれ早稲田から独特な電池のユニットが出てくれれば素晴らしいと思います。ほか、JSTのプロジェクトで米・英・独・濠らの研究者と共に、リサイクルを含めたトータルでの電池開発を進めています。電池は世界で流通しているものなので、一つの国だけで研究していても意味がありません。学生たちにも、ドクターに進むにしろ企業に行くにしろ、ネットワークを広げていってほしいと思います。



【研究員】

Wiley Top Downloaded Article (IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering)	大木 義路 (各務記念材料技術研究所・特任研究教授)
一般社団法人ターボ機械協会 ターボ機械協会技術賞	宮川 和芳 (機械科学・航空宇宙学科・教授／各務記念材料技術研究所・兼任研究員)
廃棄物資源循環学会 令和5年度 著作賞	所 千晴 (環境資源工学科・教授／各務記念材料技術研究所・兼任研究員)
IEEE DEIS (米国電気電子学会誘電・絶縁部門学会) Thomas W. Dakin Distinguished Technical Contributions Award	大木 義路 (各務記念材料技術研究所・特任研究教授)
The 2024 International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials Best Paper Award	平井 直志 (各務記念材料技術研究所・上級研究員)
The 2024 International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials Best Paper Award	大木 義路 (各務記念材料技術研究所・特任研究教授)
電気学会 基礎・材料・共通部門 特別賞 論文賞	大木 義路 (各務記念材料技術研究所・特任研究教授)
電気学会 基礎・材料・共通部門 特別賞 論文査読功労賞	大木 義路 (各務記念材料技術研究所・特任研究教授)
日本機械学会 日本機械学会流体工学部門賞	宮川 和芳 (機械科学・航空宇宙学科・教授／各務記念材料技術研究所・兼任研究員)
第 68 回生活と環境全国大会 環境大臣表彰 (令和6年度廃棄物・浄化槽研究開発功労者)	所 千晴 (環境資源工学科・教授／各務記念材料技術研究所・兼任研究員)
公益社団法人日本表面真空学会 女性研究者賞 (若手女性研究者優秀賞)	高山 あかり (物理学科・准教授／各務記念材料技術研究所・兼任研究員)
軽金属学会 第16 回軽金属女性未来賞	高松 聖美 (鈴木研究室・助教)
The World Foundry Organization 2024 WFO Young Researchers and Early Career Conference 1st Best Paper	沖村 泰彦 (吉田研究室・助教)
8th International Conference on Cellular Materials CellMAT2024 Best Poster Award 3rd place	高松 聖美 (鈴木研究室・助教)
17th International Conference on Sensing Technology (ICST2024) Best Presentation-Runner up	池沢 聡 (岩瀬研究室・次席研究員)
中国天津大学 名誉教授	大木 義路 (各務記念材料技術研究所・特任研究教授)
High Voltage (学術誌) Certificate of Excellent Paper (Review Paper)	大木 義路 (各務記念材料技術研究所・特任研究教授)
High Voltage (学術誌) Certificate of Excellent Paper (Regular Paper)	大木 義路 (各務記念材料技術研究所・特任研究教授)
High Voltage (学術誌) Certificate of Excellent Paper (Regular Paper)	平井 直志 (各務記念材料技術研究所・上級研究員)
電気学会英文論文誌 (学術誌) Top Cited Article (Jan.–Dec. 2023)	大木 義路 (各務記念材料技術研究所・特任研究教授)

【学生】

早稲田大学 理工学術院総合研究所 第13 期アーリーバードプログラム 成果報告会 優秀賞	阪井 健人 (宮川研究室・D1)
日本鉄鋼協会 第187 回春季講演大会ポスターセッション学生奨励賞	藤森 俊亮 (鈴木研究室・M1)
電気学会 電気学会奨励賞	佐々木 達也 (小林研究室・M1)
一般社団法人 日本機械学会 三浦賞	花田 知優 (鈴木研究室・M2)
一般社団法人 日本機械学会 三浦賞	中村 凪 (岩瀬研究室・M2)
公益社団法人 計測自動制御学会 SICE 優秀学生賞	水名 京 (岩瀬研究室・M2)
早稲田大学 小野梓記念賞 (学術賞)	佐藤 峻 (岩瀬研究室・D3)
NGCS13 (Natural Gas Conversion Symposium 13rd) The best poster award	渡辺 光亮 (関根研究室・D2)

※2024年度の受賞者を掲載しておりますが、一部2023年度の受賞者を含む場合があります。
※受賞者の情報は、受賞時の情報で記載しております。(一部除く)

【学生】

NGCS13 (Natural Gas Conversion Symposium 13rd) The best oral presentation award	七種 紘規 (関根研究室・D2)
日本機械学会 関東支部第 30 期講演会 若手優秀講演賞	後藤 勇樹 (細井研究室・M2)
245th ECS Meeting General Student Poster Session Award 2nd Prize	Zhengke Tu (本間・福永研究室・D2)
軽金属学会 第146 回春期大会 Excellent English Poster Award	門井 洸衛 (鈴木研究室・M2)
ターボ機械協会第 90 回学術講演会 若手優秀講演賞	児玉 一騎 (宮川研究室・M1)
ターボ機械協会第 90 回学術講演会 若手優秀講演賞	村上 颯聖 (宮川研究室・M1)
The 20th International Symposium on Silicon Chemistry (ISOS-20) THE POSTER-PRESENTATION AWARD (Nanoscale Horizons Poster Prize)	鈴木 麻由 (下嶋研究室・M1)
日本材料科学会 若手奨励賞	林 宏盛 (荒尾研究室・M1)
触媒学会夏の研修会 優秀口頭発表賞	重本 彩香 (関根研究室・D3)
軽金属学会関東支部 第10 回 若手研究者ポスター発表会 関東支部奨励賞	門井 洸衛 (鈴木研究室・M2)
日本液晶学会 虹彩賞	渡嘉敷 晴 (多辺研究室・M2)
20th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids (DSL2024) Best Poster Award First Place	堀越 晴貴 (鈴木研究室・M1)
Integrated Nanocomposites for Thermal and Kinetic Energy Harvesting (INTAKE) Seminar 2024 Session Award	小口 篤紀 (岩瀬研究室・M2)
19th TOIN International Symposium on Biomedical Engineering Best Poster Presentation	岸 絢那 (山本研究室・M1)
34th International Symposium on Transport Phenomena Best Student's Presentation Award	阪井 健人 (宮川研究室・D2)
軽金属学会 第147 回秋期大会 Excellent English Poster Award	若井 悠真 (鈴木研究室・D2)
軽金属学会 第147 回秋期大会 優秀ポスター発表賞	土田 菜摘 (鈴木研究室・D2)
日本マイクログラビティ応用学会 第36 回学術講演会 毛利ポスターセッション 敢闘賞	門井 洸衛 (鈴木研究室・M2)
ターボ機械協会 第91 回熊本八代講演会 若手優秀講演賞	玉田 洋一朗 (宮川研究室・M2)
The 17th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology Best Poster	Minxuan Cai (山口研究室・M2)
応用物理学会 第57 回応用物理学会講演奨励賞	島野 耀康 (柳谷研究室・M2)
表面技術協会 第26 回優秀講演賞	鈴木 律兵 (本間研究室・M1)
日本マイクログラビティ応用学会 第36 回学術講演会 毛利ポスターセッション 奨励賞	上野 遥か (鈴木研究室・B4)
日本マイクログラビティ応用学会 第36 回学術講演会 毛利ポスターセッション 奨励賞	川嶋 啓太 (鈴木研究室・M1)
日本化学会秋季事業 第14 回 CSJ 化学フェスタ 2024 優秀ポスター発表賞	鵜飼 千尋 (関根研究室・M2)
日本鑄造工学会関東支部 学生優秀講演賞	土田 菜摘 (鈴木研究室・D2)
第44 回水素エネルギー協会 (HESS) 大会 学生優秀発表賞	大淵 ゆきの (関根研究室・M2)
日本化学会秋季事業 第14 回 CSJ 化学フェスタ 2024 優秀ポスター発表賞	沖田 知弘 (下嶋研究室・M1)
日本化学会秋季事業 第14 回 CSJ 化学フェスタ 2024 優秀ポスター発表賞	伊藤 萌々花 (下嶋研究室・M1)
第14 回 次世代天然ガス利用を考える若手勉強会 学生発表賞	松本 さくら (関根研究室・B4)
トライボロジー会議 2024 秋 名護 学生奨励賞	澤木 昂 (本間研究室・LD2)
一般社団法人 日本機械学会 三浦賞	門井 洸衛 (鈴木研究室・M2)
一般社団法人 日本機械学会 三浦賞	小口 篤紀 (岩瀬研究室・M2)
日本鉄鋼協会 第189 回春季講演大会 学生ポスターセッション 奨励賞	渡邊 伊織 (山口研究室・M1)
早稲田大学理工学術院総合研究所 若手研究者奨励賞	阪井 健人 (宮川研究室・D2)
早稲田大学理工学術院総合研究所 waseda Early Bird 2024 PRESENTATION CONTEST 最優秀賞	阪井 健人 (宮川研究室・D2)
表面技術協会 第150 回講演大会 第13 回学生優秀講演賞	TRAKULDIT Supicha (鈴木研究室・D2)
日本金属学会 2025 年春期第176 回講演大会 第44 回優秀ポスター賞	櫛倉 祐太 (鈴木研究室・M1)