

[小特集]

カーボンニュートラルと 分散電源と次世代エネルギー

- カーボンニュートラル実現に向けた需要サイドの分散型電源の活用
- カーボンニュートラル実現に向けた政策動向及び標準化
- ECHONET Lite及びECHONET Lite Web APIのエネルギー分野での活用
- サステナブルなICTインフラの実現に向けて
- 無線電力伝送と通信の融合によるミリ波帯中継器



電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン

論文の書き方講座(Q & A セッション) 開催のお知らせ

一般社団法人 電子情報通信学会
通信ソサイエティ

通信ソサイエティでは、論文の書き方について会員の皆様に広く深く御理解頂くために、2025年ソサイエティ大会において、論文の書き方講座(Q&Aセッション)を下記のとおり開催致します。

論文の書き方講座は、2009年3月以来、総合大会／ソサイエティ大会において継続的に開催され、数多くの方に御参加頂き、大変御好評を頂いております。

通信ソサイエティ和文論文誌・英文論文誌・ComEXの委員長／副委員長経験者が講師を務める講座ですので、論文執筆のポイントを聞ける貴重な機会となっております。大学あるいは企業において論文執筆に御興味をお持ちの方は是非御参加下さい。

今回は参加者からの御質問にお答えする論文の書き方講座(Q&Aセッション)を開催致します。多数の皆様の御来場をお待ち致しております。

なお、御質問に効率的にお答えするため、下記のフォームから御質問の事前登録をお願い致します。過去に開催された論文の書き方講座の動画像・資料はこちらのフォームに記載されたリンクから御覧下さい。

<https://forms.cloud.microsoft/r/9wmYwL8yHK>



BK-2 『論文の書き方講座 (Q&Aセッション)』

日時：2025年9月10日(水) 9:30～10:30

場所：岡山大学 工学部1号館 第1講義室

講師：鈴木 一哉(秋田県立大学)

木下 和彦(徳島大学)

廣田 悠介(情報通信研究機構)

司会：有馬 卓司(東京農工大学)

定員：140名

※ 参加費について

本セッションは一般無料公開セッションとなりました。
本セッションのみ参加の際は参加費は必要ありません。

編集チームリーダー 早馬道也
Michiya Hayama

カーボンニュートラルと 分散電源と次世代エネルギー

電気は単にエネルギーを伝送するだけでなく、半導体を含む種々の電気・電子部品を使って高速かつ高度に制御可能であることから、19世紀にエジソンが電気事業を開始して以来、普及と発展を続け、現代では人々の生活になくてはならないものとなっています。本小特集では電気が支えるカーボンニュートラル技術として、分散電源や太陽光発電・風力発電といった次世代エネルギーに焦点を当てて、それを取り巻く政策・標準化動向、関連技術について解説します。

カーボンニュートラル実現に必要な技術の一つとして挙げられているのが、分散電源を活用したデマンドレスポンスです。ここで言う分散電源とは、送電網上に分散している太陽光発電・風力発電といった再生可能エネルギー（再エネ）や蓄電設備、能動的な制御により電力消費を調整可能な電力消費者（需要家）を総称したものです。デマンドレスポンスでは、日照や風況などの自然環境に左右されやすい再エネ電力を、送電網上の分散電源がリアルタイムに電力を入出力制御することで需要と供給を成立させます。デマンドレスポンスが実現された送電網は、もはや通信網そのものであり、そこには分散電源同士が互いに情報を正しくやり取りするためのプロトコルや標準規格が必要不可欠です。本小特集で紹介する3件の解説記事では、こうしたプロトコルや標準規格の国内外動向、実際の通信規格の動作を取り扱っています。

また、2件の解説記事では電力伝送制御に関する次世代技術として「ワット・ビット連携」と「無線電力伝送」という二つのテーマを紹介します。ワット・ビット連携とは、地理的に分散したデータセンター間で計算量（ビット）を調整することで電力消費（ワット）を調整可能な分散電源として機能させるという技術です。

本小特集を通してカーボンニュートラルを中心にエネルギー分野に起きている技術革新と動向を知って頂ければ幸いです。

最後に、小特集の発行にあたり、御執筆頂いた皆様、編集委員の皆様、査読・校閲で御協力頂いた皆様に心から感謝致します。

小特集編集チーム

早馬道也、内田大輔、中西孝行、松室亮之、水野 修



122



157



167



176

【小特集】

カーボンニュートラルと 分散電源と次世代エネルギー

119

巻頭言

編集チームリーダー

早馬道也

125

— 解説 —

カーボンニュートラル実現に向けた
需要サイドの分散型電源の活用

小林延久

136

— 解説 —

カーボンニュートラル実現に向けた
政策動向及び標準化

今井 毅

143

— 解説 —

ECHONET Lite 及び ECHONET Lite
Web API のエネルギー分野での活用

佐方 連

150

— 解説 —

サステナブルな ICT インフラの実現に向けて

林 俊宏

157

— 解説論文 —

無線電力伝送と通信の融合による
ミリ波帯中継器

白根篤史

- 122 | **ー子どもに教えたい通信のしくみ：ジュニア会員向けページー**
「電気」と「磁気」が織りなすコイルの不思議
今岡 淳
- 167 | **ー若者よ、世界に出よう！ー**
アナザースカイでの成長～スイス研究留学記～
上手洋子
- 176 | **ー開発物語ー**
工学院大学VRプロジェクト：IVRC 2024決勝出場への道のり
牛田啓太
- 184 | **ーこんなツール、使っていますー**
GPU を利用したPyTorch 入門
レオ チー シャン／西崎博光
- 195 | **ー街 plus 探訪ー**
何度も訪れたい「いせ」
眞田耕輔
- 199 | **ー科学館・博物館めぐりー**
千葉市科学館
木下雅之
- 207 | **ー巻末言ー**
研究会のたのしみ
通信ソサイエティ副会長
岡田 啓

通信ソサイエティからのお知らせ

- 202 | **2024 年度通信ソサイエティ論文賞・マガジン賞**
～受賞論文・記事と総評～
通信ソサイエティ編集会議
- 208 | **編集後記**

「電気」と「磁気」が織りなす コイルの不思議

名古屋大学 今岡 淳
Jun Imaoka

1. はじめに

コイルは、電気回路や電子回路に利用される受動素子の一つです。この応用範囲は、AI（人工知能）用データセンターなどの情報通信産業から、自動車などのモビリティ、生活を支える電力インフラ、身の回りの家電製品など電気を利用するほとんどの機器に利用され、私たちの生活になくてはならない存在です。コイルの歴史をひも解くと、1820年デンマークの物理学者エルステッドが「電気」と「磁気」の不思議な関係を「偶然」発見したことから全てが始まります。そんな現代で、幅広く利用されるコイルはどんな効果があるのでしょうか。また、最初の発見から約200年経過した現代で、どんなことに使われているのでしょうか。皆さんと一緒に考えてみたいと思います。

2. エルステッドさんによる「電気」と「磁気」の不思議な関係の発見

「電気」と「磁気」の不思議な関係は、エルステッドさんが導線に電流を流す実験中に偶然発見されました。図1に示す回路に電流を流したところ、偶然、導線の

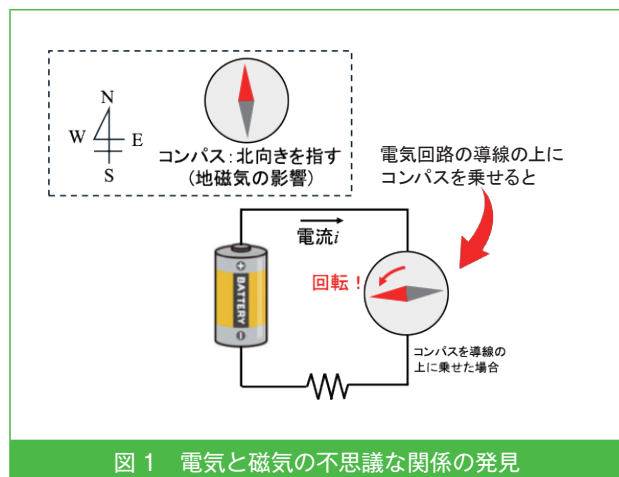


図1 電気と磁気のおもしろな関係の発見

上に置かれていたコンパスの針が、北とは異なる方向を指したことから始まります。この理由は後に分かるのですが、電流が流れると導線の周囲に「磁石の世界」が発生していたためです。この発見をきっかけに、世界中の物理学者が「電気」と「磁気」の不思議な関係解明に挑み、その結果、現代社会ではこれらの原理を応用した製品が数多く利用されるようになりました。

3. コイルのしくみ

コイルのしくみを述べる前に磁石の世界について説明します。磁石の周りには磁石の強さを表す「磁束」と呼ばれる、目には見えない流れのようなものがあり、N極から出てS極に入る方向に向かって発生しています。磁石では図2に示すような紫色の磁束が発生していますが、実は導線に電流を流しても磁束は発生します。ここでコイルは、図3に示すように導線をらせん状に巻いて作られます。このらせん状の導線に電流を流すと、空間

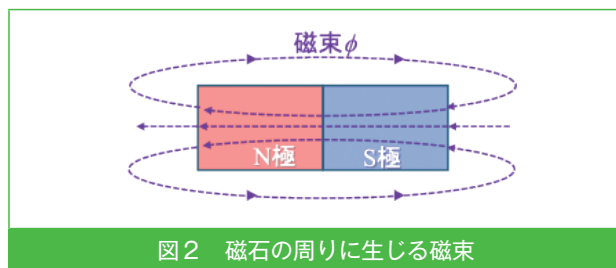


図2 磁石の周りに生じる磁束

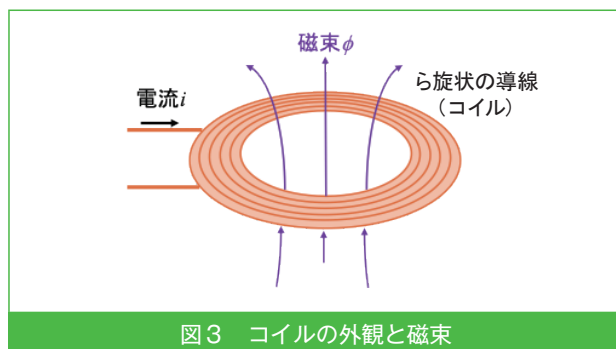
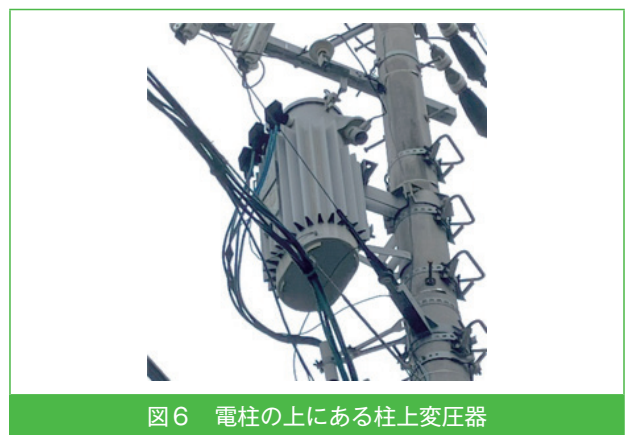
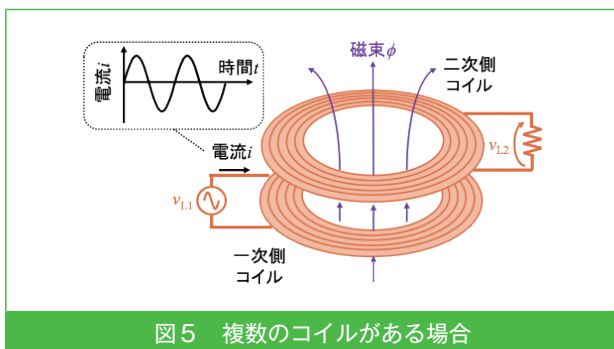
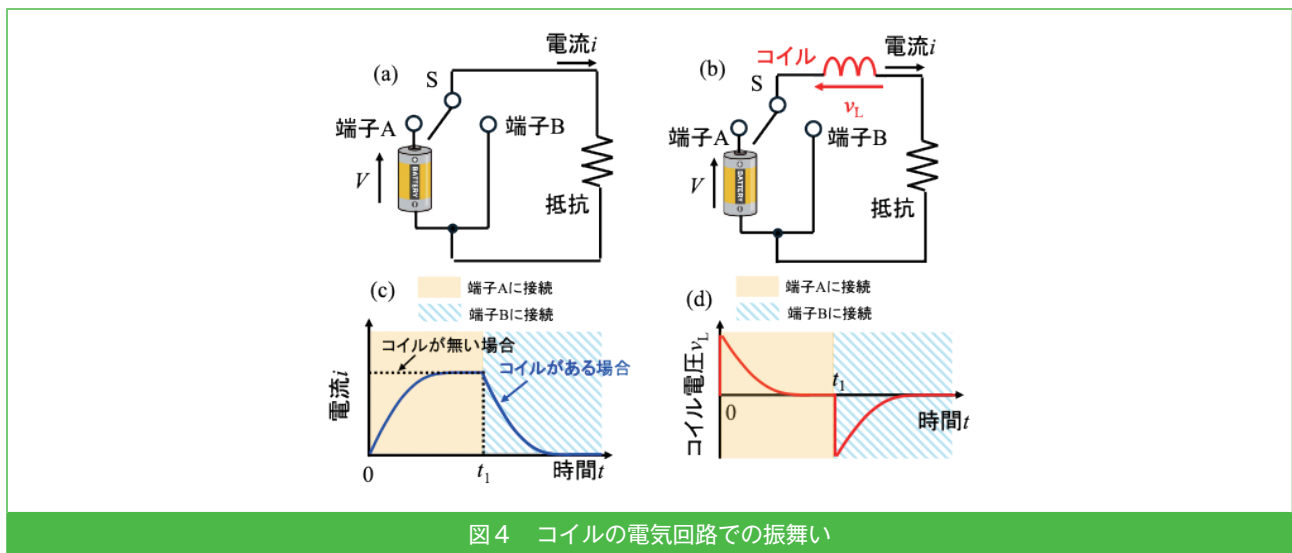


図3 コイルの外観と磁束



には磁束がたくさん発生し、コイルは「インダクタンス」と呼ばれる電気的特性を持つようになります。

では、このインダクタンスは電気回路においてどのような性質を示すのでしょうか。図4(a)に示す「抵抗のみ」の回路と図4(b)に示す「コイルと抵抗」から成る回路に電池を接続する場合を考えてみます。図4(a)の回路でスイッチSを時刻 $t=0$ で端子Aに接続すると、オームの法則に従って電流（図4(c)の点線の電流）が瞬時に流れます。しかし、図4(b)に示すように、コイルを入れたら、電流は図4(c)の青線で示すように徐々に増加していきます。この徐々に増加する理由は図4(d)に示すように“電流の増加を妨げる向き”にコイル電圧 v_L が発生しているためです。その後、図4(c)で十分に時間が経過した時刻 $t=t_1$ で、スイッチSを端子Aから端子Bに切り換えると、抵抗のみの回路では電流が瞬時にゼロになるのに対し、コイルがあると電流は一定時間流れ続けます。これも同じように電流が“減少することを妨げる”ために、コイルに電圧が発生し、電流を流し続けようとする。何だか、コイルは“電流の変化を嫌う性質”があるようですね。

次に、コイルはもう一つの別の性質を持っています。これは、時間変化する磁束 ϕ がほかの巻線にも交わると、電圧が誘導されるというものです。図5に示すと

おり二つのコイルを用意し、一つ目のコイルに時間変化する電流（交流電流）を流します。そうすると空間には「時間変化する磁束 ϕ 」が同じく発生します。この磁束が2番目のコイルに交わると、2番目のコイルには空間を隔てていても電圧 v_{L2} を誘導できるというものです。実は、電柱の上にぶら下がっている「変圧器」（図6）がこの原理です。

4. コイルの応用

さて、ここからは具体的にコイルを利用した近年の応用について考えてみましょう。近年ではAIという言葉をよく耳にするようになりました。AIを利用するためには、導体と絶縁体の両方の機能を持つ「半導体」と呼ばれる素子が必要です。イメージとしては図4のスイッチSの役割と思って下さい。この半導体を利用すると、最近ニュースで耳にするGPU（Graphics Processing Unit）やCPU（Central Processing Unit）などの電子演算器を作成できます。ただし、これらの電子演算器を安定に動作させるためには、数百から千アンペア程度の直流電流を供給する必要があります。では、安定した

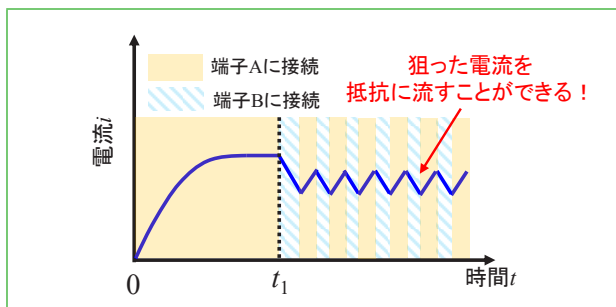


図7 スイッチ S をたくさん切り換えた場合の電流

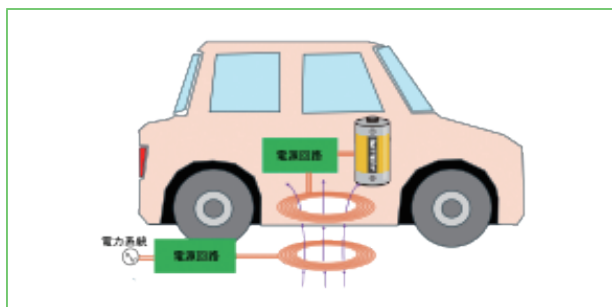


図8 停車中ワイヤレス給電装置

直流電流を供給するためにはどうしたらいいでしょうか。そのヒントとして、図4(b)のスイッチ S を高速に端子 A と B に切り換えたら、図7に示すように狙った電流値になりそうじゃないですか？ 考えてみて下さい。また、安定した直流電流を供給しなければならないのは電子演算器だけではありません。自動車などの電動モビリティや家電製品でも一緒です。このような回路を「電源回路」と呼び、電気が用いられているあらゆる場面で用いられています。そして、電源回路にコイルは必須のアイテムとなります。

また、次世代の給電方法としてワイヤレス給電も注目されています。従来はコンセントに接続して導線で電気を伝えていましたが、今後は導線がなくても電気を伝えることができる時代になります。この原理は3.で述べた2番目のコイルの性質を生かすものです。これによって空間を隔てても時間変化する磁束が通れば、電気を伝えることができるわけです。このワイヤレス給電技術は、既にスマートフォンの「置くだけ充電」として実用化されています。

今後は、利便性を高めるため様々な応用で活用が期待されています。例えば、現在、世界では電動モビリティの自動運転の開発が進められています。しかしながら、ワイヤレス給電技術がなければ、充電のたびに人が充電器を車に接続する必要がありますね。現在は停車した際に充電されるワイヤレス給電装置（図8）が開発されて

いますが、今後は道路にコイルを埋め込み、走行中の車に充電し続ける「走行中ワイヤレス給電装置」も開発されています。このような技術が確立されれば、少しの電池で長く走ることができるのはもちろんのこと、充電の手間も大きく削減できそうですね。

5. まとめ

コイルのしくみについて簡単に紹介しました。一見複雑そうに見えるコイルですが、実は私たちの生活にとっても身近な存在です。折りに触れて、電気製品の中を見てみて下さい。ら旋状に巻かれた導線を持つ素子があるはずで、エルステッドさんの発見から200年経過しました。次の100年はどんな新しい製品やアイデアが社会に実装されていくのでしょうか。

今岡 淳 (正員: シニア会員)

2015 島根大大学院総合理工学研究科博士課程了。博士(工学)。同年から九大大学院システム情報科学研究院助教。2018 名大工学研究科電気工学専攻助教。2021 同大学未来材料・システム研究所准教授。専門はパワーエレクトロニクス。特に磁気部品、磁性材料応用、電源の低ノイズ化、化合物半導体応用、パワエレ用シミュレーション技術などを対象に各要素技術の高性能化に関する研究に従事。



カーボンニュートラル実現に向けた 需要サイドの分散型電源の活用

小林延久 Nobuhisa Kobayashi 早稲田大学

1 カーボンニュートラルの実現の必要性

地球上に生きる全ての生命にとって、掛け替えのない地球環境は温暖化の一途をたどり、既に我々の生存環境を脅かし始めている。国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）は第6次報告書⁽¹⁾において、地球温暖化は人間の社会活動により大気中に排出、蓄積された二酸化炭素（CO₂: Carbon dioxide）を主とする温室効果ガス（GHG: Green House Gas）が引き起こしたことに「疑う余地がない」と断言した。一方、国連気候変動枠組条約締約国会議（COP: Conference Of Parties）は地球

環境のリスク低減のため、地球平均温度上昇を2℃未満に抑えることで合意⁽²⁾し、2050年CO₂排出実質ゼロ（カーボンニュートラル）実現を目指している。しかし、グローバルカーボンプロジェクト（GCP: Global Carbon Project）が図1に報告⁽³⁾するように、CO₂排出量は新型コロナウイルス感染症パンデミックによる経済活動沈滞で一時低下したものの、2021年以降、それ以前の約40 GtCO₂/年に戻っている。地球の平均温度上昇は気象観測結果⁽⁴⁾から図2に示すように、2023年には産業革命以前に比べ1.5℃を上回った日数が年

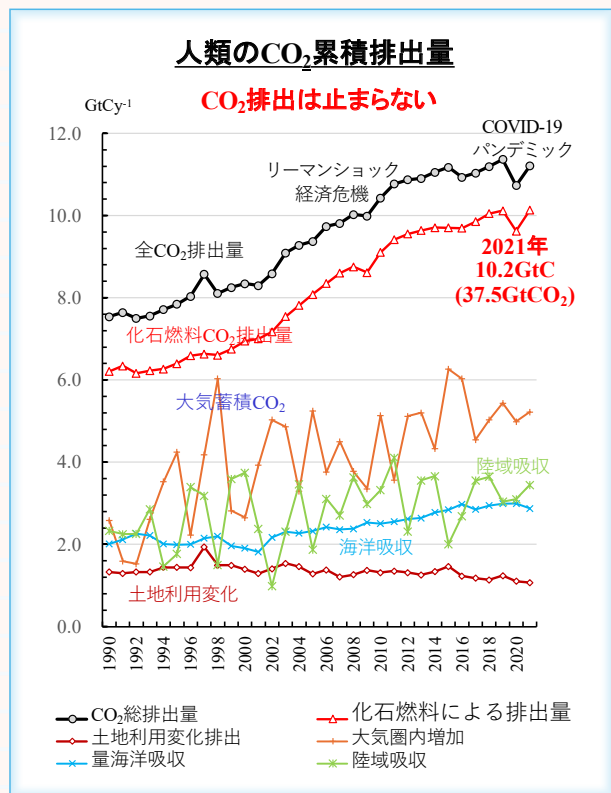


図1 産業革命後のCO₂排出推移
出典: Global Carbon Budget 2022

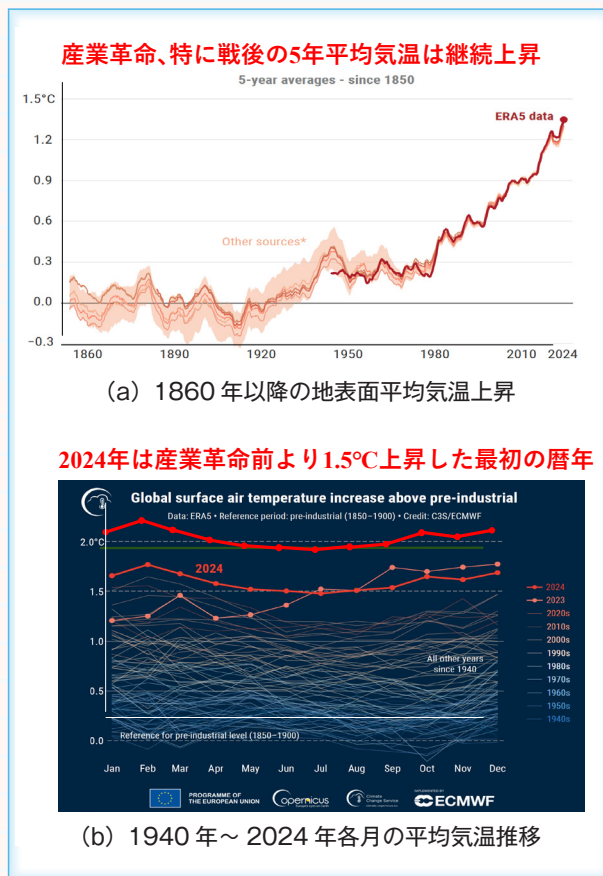


図2 平均気温の推移
出典: Global Carbon Budget 2022

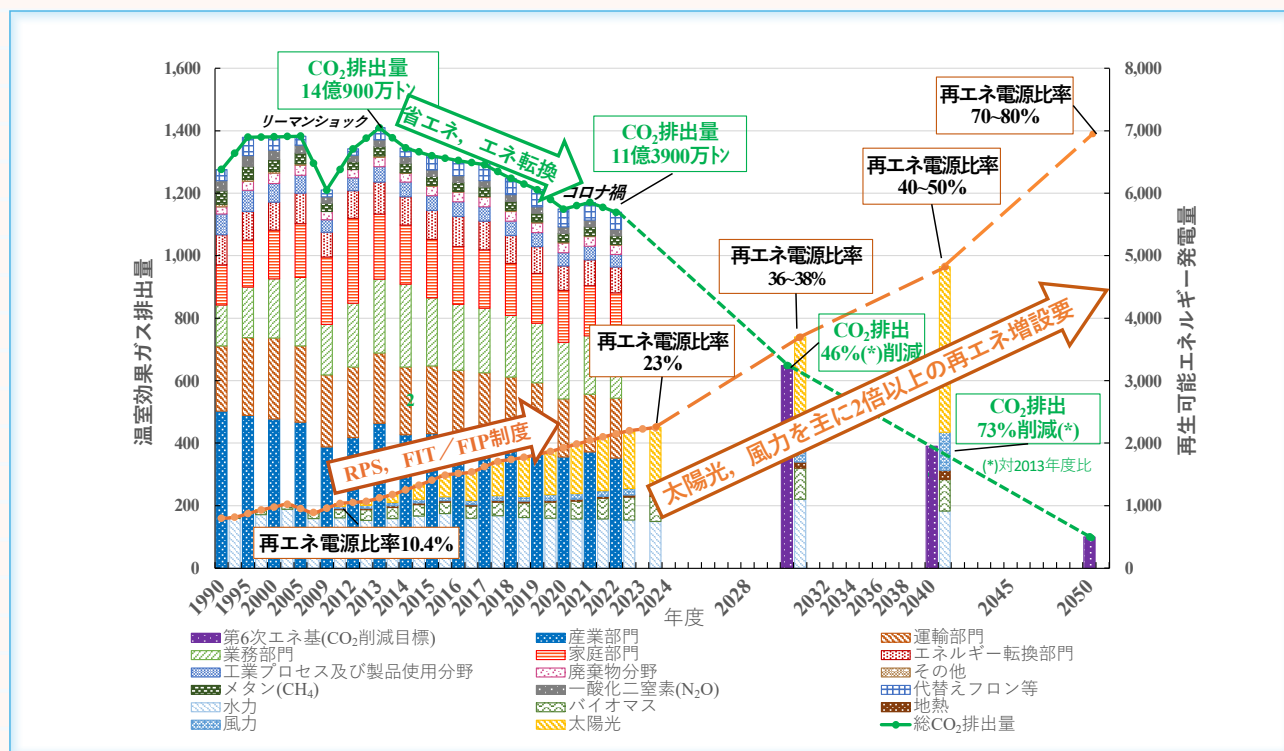


図3 エネルギー基本計画によるCO₂削減と再エネ増設

出典：経産省 2023 年度エネルギー需給実績

間の3分の1程度となり、2024年はついに年間を通じ、全ての月の平均気温が1.5℃以上となった。

カーボンニュートラルを実現するには、CO₂の大きな排出源である化石燃料を使用する火力発電を太陽光発電(PV: Photovoltaic)、風力発電(WT: Wind Turbine)などの再生可能エネルギー(RE: Renewable Energy, 以降、再エネ)に転換し、①再エネの電力による電化、②省エネ、③需給連携による電力最適利用、が必要である。ただし、再エネの発電は人知の及ばない日照、風況の変化などの自然環境に左右されるため、再エネの主力電源化には再エネの発電量(供給力)の確保のみでなく、再エネ発電量の変動を補完し、電力の安定供給を担保するための電力(調整力)が必要である。現在、この調整力のほとんどが化石燃料を使用する大規模火力発電所の発電余力から供給されている。今後、大規模火力発電所は再エネに対する環境性、経済性などから休廃止が必至なため、調整力の供給源の確保が必要である。

この対策に国際エネルギー機関(IEA: International Energy Agency)は電力の消費者である需要家サイドの需要設備、再エネ発電設備などを含む分散型電源(DER: Distributed Energy Resources)からの調整力を活用するデマンドレスポンス(DR: Demand Response)を挙げている。以降、本稿では、電力安定供給に活用するための調整力を、DERの本来の機能を毀損することなく、その設備、運用などの余力から創出し、流通させるアグリゲーション機能について解説する。

2

日本のカーボンニュートラル実現の目標と課題

日本では官民を挙げて「2050年カーボンニュートラル実現」を目指し、関係する法制度の整備、再エネ増設による脱炭素化が推進されている。図3に示すように産業界は省エネを主に、2022年度に2013年度比19%のCO₂排出削減を実現し、更に省エネ努力を継続している。政府は2021年10月に策定した第6次エネルギー基本計画(以降、エネ基)の目標値を、2050年CO₂排出ネットゼロ実現に向けて直線補間し、2040年度にCO₂を排出しない電源割合(再エネ比率)40~50%、CO₂排出量を2013年度比73%削減する、野心的な目標を第7次エネ基⁽⁵⁾として2025年2月に閣議決定している。

この達成には再エネ増設に必要な用地の確保、送配電系統の増強などの問題の解決が不可欠である。また、電力の安定運用には電力の需給バランス調整、送配電系統の混雑/電圧管理、電力貯蔵、系統周波数維持のための慣性力などの技術開発が必須である。

しかし、カーボンニュートラル実現のベースとなる再エネ増設は課題を抱えるものの、電気事業者に一定割合の再エネ利用を義務付ける「再生可能エネルギー導入量割当制度(RPS: Renewables Portfolio Standard)」, 再エネ電力を一定期間、一定価格で買取りを保証する「固定価格買取制度(FIT: Feed-in Tariff)」, 再エネの

表1 再エネ増設が電力安定供給に与える影響と対策

現象		電力安定供給への影響	需要サイドの対策	流通サイドの対策	
送電系統の課題	平常時	需給バランス乱れ	天気予報ハズレによる再エネ発電変動による周波数乱れ	分散型電源の需要上げ下げ調整【調整力（Δ kW）】、電源確保	
		余剰電力発生	昼間、太陽光発電出力増加、発電機最低出力の供給が需要を超え、余剰電力発生	分散型電源の需要／蓄エネ上げ調整【調整力（Δ kW）／供給力（kWh）】	需給調整【調整力（Δ kW）／供給力（kWh）】、地域間連系線、出力抑制
		ダックカーブ発生	夕刻、太陽光発電出力低下、電力需要ピークと重なり、供給力の追加確保が必要	分散型電源の需要減、放エネ（下げ調整）【調整力（Δ kW）／供給力（kWh）】	需給調整【調整力（Δ kW）／供給力（kWh）】、発電機の出力増
	事故時	系統擾乱拡大	系統事故時、瞬時電圧低下で分散型電源一斉解列、周波数低下	太陽光発電 FRT（フォルトライドスルー）要件対応	系統運用システムによる過渡安定度確保
		系統安定度低下	発電機並列運転台数低下、同期化力、慣性力低減	－	GFM（グリッドフォーミングインバータ）の慣性力確保
配電系統の課題	平常時	配電系統混雑	再エネの逆潮が変電所制約超過、再エネ最大阻害	分散型電源の需要上げ下げ調整【調整力（Δ kW）】	出力制御、配電系統設備増改修
		配電系統電圧上昇	再エネからの逆潮による電圧上昇、適正電圧逸脱	インバータ電源の力率、発電制御【調整力（Var）】	配電自動化システム、調相設備の設備増改修
		フリッカ発生	太陽光発電単独運転検出機能設定不良で電圧変動	太陽光発電の設定修正	配電自動化システムによるフリッカ発生把握
	事故時	分散型電源の相互干渉	太陽光発電が同一系統連系時、単独運転検出機能差で検出信号干渉し全停止	太陽光発電 FRT（フォルトライドスルー）要件対応	－

普及に向け市場統合を目指す「フィードインプレミアム制度 (FIP: Feed-in Premium)」により拡大した⁽⁶⁾。現在、FIT の買取期間の終了、再エネの設備導入コストの高止まりなどから設置が伸び悩んでいるものの、2024 年度末時点の再エネ累積設備容量は PV を主に約 78 GW に迫る状況にある。ただし、カーボンニュートラルの実現には、更に 2 倍以上の再エネ増設が必要である。

再エネの増設が電力安定供給に与える影響と対策を表 1 に示す。特に、天気予報が大きく外れるケースでは一般送配電事業者 (送電事業者 TSO: Transmission System Operator, 配電事業者 DSO: Distribution System Operator) の再エネ発電予測、電力需要予測を狂わせ、電力の需給バランスの乱れを生み、供給電力の周波数、電圧などの電力品質を悪化させる。これに対し、現在、日本では TSO が需給調整市場を介し DER などから調整力を調達、運用して対策している。また、天候状況などによる再エネの発電量と電力需要量の増減は、従来にない配電系統の潮流の変化を生じさせ、配電系統の制約から配電系統に混雑、電圧上昇などの問題を引き起こす。これに対し、欧州では既に対策、検討⁽⁷⁾が行われているが、日本では DSO による個別の配電設備の増改修などによる対策にとどまっている。しかし、今後、住宅屋根置き PV の増加などにより問題の顕在化が予想される。DER によるこれらの対策検討の前提となる日本の法制度について次に述べる。

3

日本の電力供給の流れと同時同量による需給調整

日本では電力システム改革によって、旧電気事業者の発電、小売、送配電の各部門が分離され、独立した事業者となった。独立した小売電気、発電事業者がそれぞれ需要、発電計画を作成、これを守ることで電力需給一致が図られる。これを「計画値同時同量」という。一般送配電事業者は最終的な実需時の需給バランス調整を行う。

日本の電力供給、需給調整の流れを図 4 に示す。小売電気事業者は全国大の需給調整を行う電力広域的運営推進機関 (OCCTO: Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operator) の需要予測に基づき発電販売計画を電力供給を行う前日正午までに提出し、これを実需 1 時間前まで変更する。小売電気事業者はこの計画を満たす供給力 (kWh) を発電事業者との相対取引、スポット市場 (一日前市場) や時間前市場 (当日市場) の市場取引で調達、電力を供給する。発電事業者は小売事業者との相対、市場取引の結果の履行のための需要調達計画を作成、OCCTO に提出し、これに従って発電を行う。一般送配電事業者は天気予報の外れなどにより需給バランスに乱れが生じた場合、実需段階で需給調整市場を介し調達する調整力 (Δ kW) を運用し、需給バランスを取り、需給の一致を図る。小売電気、発電事業者は計画値からのずれである「インバランス」に応じて、ペナルティを負う。

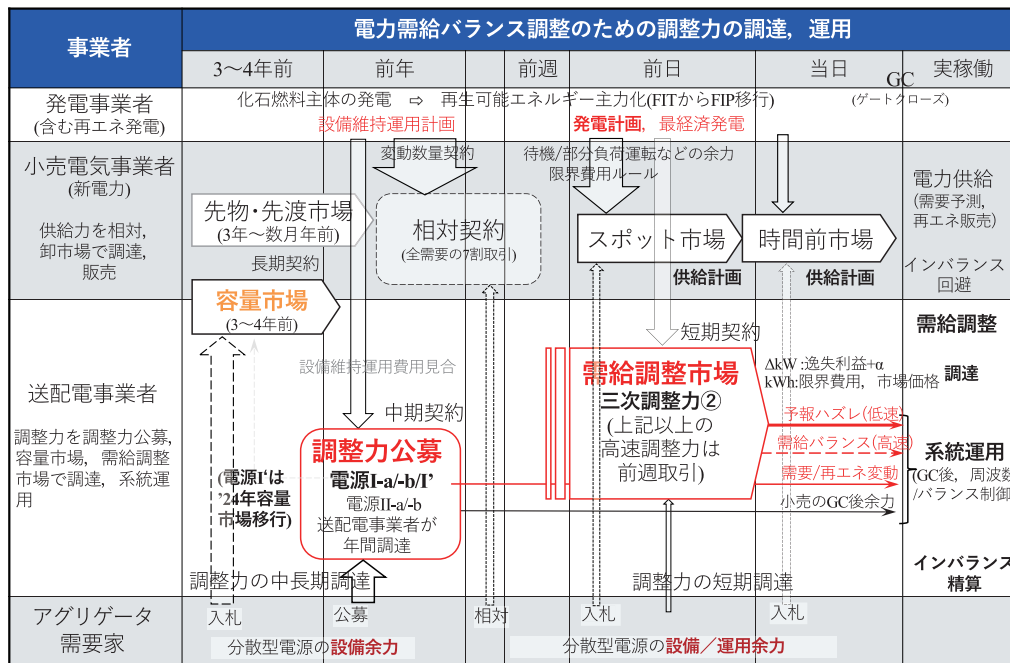


図4 日本の電力供給、需給調整の流れ

表2 需要サイドの調整力創出ポテンシャル

	評価項目	蓄熱システム	定置型蓄電池 (業務、産業用)	空調機 (ビル用マルチ)	常用発電機 (コージェネ)
設備、 調整力特性	設置台数	34,000 台	250,000 台	2150,000 台	13,000 台
	運用余力	蓄熱容量の 30%	蓄電容量の 50%	空調能力の 20%	発電容量の 20%
	創出容量	100MW × 3hr	125MW × 4hr	130MW	129MW
	調整力の 創出可能時期	下 夏季（昼間） 上 春秋（昼間）	夏季（昼間） 春秋（昼間）	夏季（昼間）	春秋冬（20～8 時）
	需給調整市場適応	三次調整力②	一 / 三次調整力	二 / 三次調整力	三次調整力①②
経済性	調整力取引収入	○（市場、相対）	○（市場、相対）	○（市場、相対）	○（市場、相対）
	運営費（燃料、水等）	○（電動式熱源機 への移行）	—（現行運営費か ら増えず）	—（現行運営費 から増えず）	—（現行運営費 から増えず）
	カーボン プライシング	○（電動式熱源機 への移行）	○（余剰電力の 蓄熱時）	—	—
環境性	CO ₂ 排出削減	○（電動式熱源機 への移行）	○（余剰電力の 蓄熱時）	○（ヒートポンプ の高効率性）	○（熱も含めた トータル効率）
	水資源	○（電動式熱源機 への移行）	—	—	—
	その他	地域熱供給活用	保守と一体化	保守と一体化	—

アグリゲータとは DER の電力需要増減、蓄放電、発電などにより DER の所期の機能に支障のない範囲で調整力を創出、集約し、需給調整市場で一般送配電事業者と週ごと、日ごとに取引する事業者である。この調整力以外に一般送配電事業者が年度ごとに調達する調整力公募、将来の発電能力である供給力 (kW) を取引する容量市場で取引される発動指令電源がある。これら需要サイドの DER の調整力創出ポテンシャルを表 2 に示す。

4 需要サイドの分散型電源による需給バランス調整

4.1 分散型電源の需給バランス調整適用の問題と標準化

需要サイド、特に業務／産業分野の比較的設備規模の大きな DER の調整力は容量、応動時間、創出の確実性及びアグリゲーション効率などから、天候による再エネの出力変動に対する需給バランス調整に有用である。しかし、DER を保有する需要家は DER の調整力の創出ポ

分散型電源の余力による調整力の電力安定供給への活用；

アグリゲーションは設備余力を集約し、電力安定供給の要件に合せて商品化。

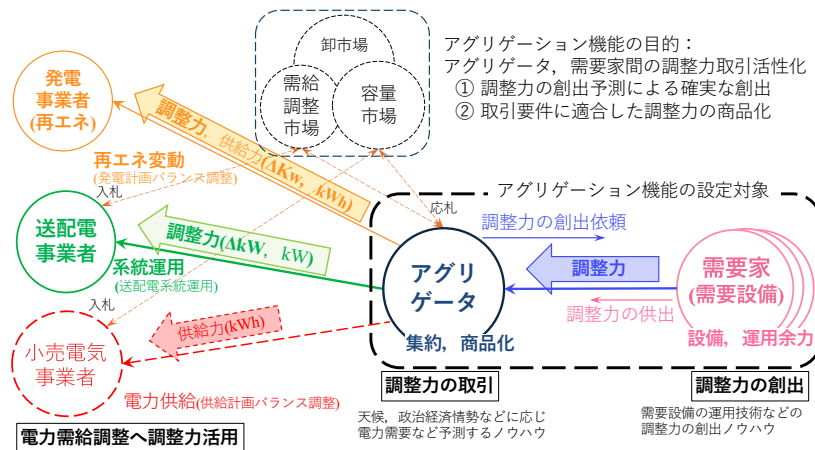


図5 DERからの調整力のアグリゲーション機能と関連

テンシナル、地球環境保全への貢献などを理解しながらも、調整力を取引する事業への参入判断が難しい状況にある。判断を難しくする要因は調整力の取引価格の低迷、DERからの調整力の創出失敗時のペナルティ、DERの本来機能毀損時の影響などである。このうち、取引価格は国際的な政治経済情勢などの関係から、先行き不透明である。ただし、DERの機能を毀損することなく調整力を創出、集約し、電力市場の取引要件を満たす商品を構成する機能を標準化することで、DERの調整力の取引事業への参入リスクを軽減できる。ひいてはDERから調整力の流通量の増加が期待できる。このため、DERの調整力の創出、集約、商品化などのアグリ

ゲーション機能をDERの設備種類によらず、共通に扱うことができるよう需要家、アグリゲータのインタフェースの標準化を検討した⁽⁸⁾。この標準化により、①調整力の評価指標による設備種別によらない公平な取引、②調整力創出の予測指標による高精度な創出管理、③単独で取引要件に適合しないDERの調整力の活用などが実現できる。

4.2 需給バランス調整の調整力のアグリゲーション機能

標準化の対象とする需給バランス調整のための調整力は、需給調整市場の取引規定を満たす三次調整力であ

調整力のアグリゲーション機能仕様

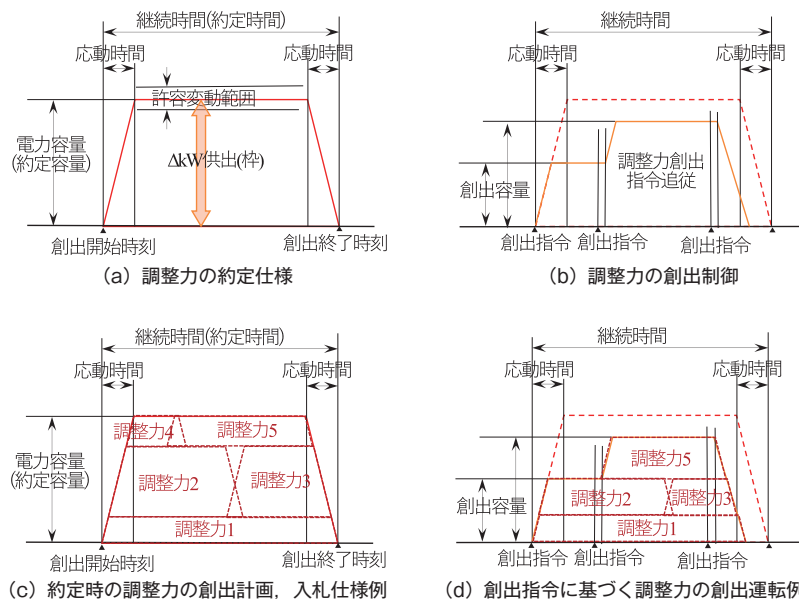


図6 需給調整市場の調整力の約定仕様と創出制御

標準化対象：調整力の創出，アグリゲーション機能とアクタ間授受情報，アルゴリズムは対象外。

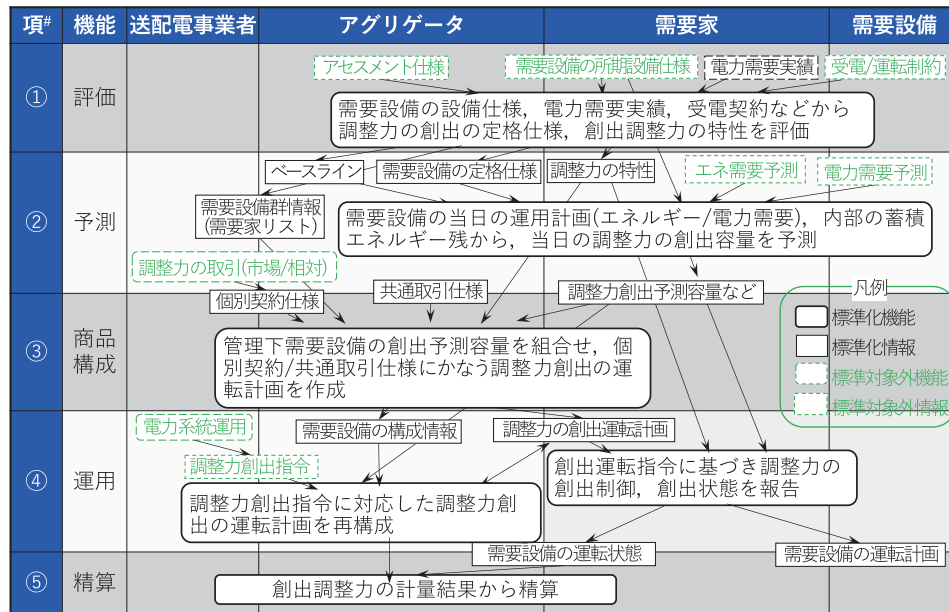


図7 DERからの調整力アグリゲーションの機能情報関連図

表3 アグリゲーション機能の構成

項*	中分類	機能名	機能概要
①	評価	ポテンシャル評価	需要設備を評価し、調整力の最大創出容量、最大期待容量などを評価。
②	予測	創出予測	電力需要予測、需要設備の運用実態などから調整力の創出容量を予測。
③	商品構成	商品構成と創出計画	需要設備からの調整力の創出予測容量とその偏差を考慮して、需要設備からの調整力を組み合わせ、商品要件を満たす創出計画、入札仕様を作成
		取引、創出計画	需要設備を組み合わせ、入札、約定後、約定仕様に合わせ、創出計画を再作成
④	運用	調整力創出運転	需要設備の電力需要変動、送配電事業者からの調整力の創出（変更）指令に対応し、約定仕様を満たす運転計画を再作成、配分、創出運転
		同時同量制御	需要設備からの調整力の創出値を30分ごとに約定仕様と実績値を一致化
		指令値追従	送配電事業者の調整力の創出（変更）指令に対応し、需要設備からの調整力の創出容量を変更、需要設備の運転計画を再作成、配分、創出運転
		応動時間高速化	取引要件を満たすため、調整力の立ち上がり、立ち下がり時間の高速化
	要件適合運転	リレー制御	需要設備からの調整力の創出をシリーズに連続して行い、調整力の創出継続時間を延長
		需要変動対応	需要設備からの調整力の創出基準となるベースラインの変動に対応し、調整力の創出容量を変更制御
⑤	精算	計量、支払	需要設備から調整力の創出運転完了後、創出した調整力を計測し、創出容量に見合った料金の支払い
⑥	異常制御	需要設備入替え	需要設備の故障などによる調整力の創出の停止、目標からの逸脱などに対応して、需要設備を入替え
		再起動時間	需要設備からの調整力の創出運転後、再度、需要設備からの調整力の創出再開時の起動時間間隔を制御

る。すなわち、旧電気事業者管内の電力系統に連系するDERの「30分精度」の有効電力である。標準の対象範囲、事業者の関係などを図5に示す。対象とする機能はアグリゲータと需要家間のものであるが、調整力を使用するTSO、調整力の取引を行う電力市場との関係も考慮に入れている。更に、今後、調整力のみでなく、供給力の取引も想定されるため、これも含めている。

需給調整市場で約定される(a)調整力の約定仕様、

(b)創出指令、(c)入札仕様、(d)創出運転を図6に示す。調整力は創出容量、継続時間、応動時間で規定される創出枠で取引され、その枠内でTSOの創出指令に追従し、アグリゲータが複数の調整力を組み合わせた約定仕様から創出、提供する。TSOの調整力への要求は必要とときに、必要な要件を満たす調整力が確実に提供されることである。

すなわち、アグリゲータによる調整力の入札は、

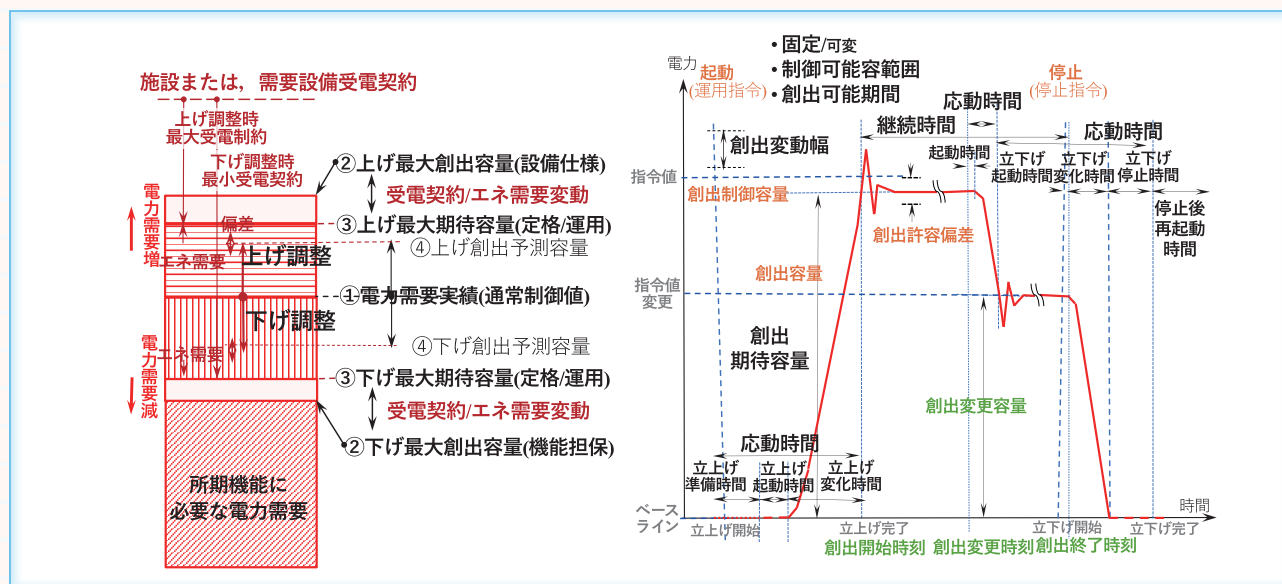


図8 分散型電源及び、その調整力の外部仕様の標準化

TSO が電力の需給バランスを取るために必要な調整力の容量、指定容量の創出継続時間、その変化時間である応動時間から成る調整力の募集仕様に対し行われる。TSO は調整力の約定仕様から電力の需給状態に応じ、アグリゲータに創出指令する。ただし、アグリゲーターは調整力の入札に当たり、複数の DER の調整力を組み合わせ、入札仕様することができる。すなわち、アグリゲータは TSO からの創出指令に従うため、約定した複数の DER の調整力を組み合わせ、創出指令を満たす調整力を創出することとなる。

4.3 調整力のアグリゲーション機能の標準化

需要家の DER の調整力のアグリゲーション機能を実現するアグリゲータ、需要家、TSO の機能分担、情報の流れを図 7、その機能仕様を表 3 に示す。

アグリゲーション機能は①アグリゲータによる DER からの調整力の創出能力の評価、②アグリゲータ、需要家による DER からの調整力の創出容量の予測、その結果を受けた③アグリゲータの入札に向けた複数の調整力を組み合わせた調整力の創出計画と商品構成、④ TSO の創出指令に対応したアグリゲータ、需要家による調整力の創出、その後の⑤アグリゲータによる調整力の創出結果に応じた料金の精算から成る。

また、事業者の機能分担と関連は以下となる。アグリゲータは①評価により、複数の需要家と DER の調整力の創出能力に応じた調整力の取引契約を結ぶ。需要家は②予測により調整力の創出容量を予想し、アグリゲータに報告する。アグリゲータは③商品構成により、調整力の需要と DER の調整力の創出容量の予測を組み合わせ、調整力の創出コストと創出リスクの最適化を図った調整力の創出計画、入札仕様を作成、入札する。約定後、ア

グリゲータは④運用により、TSO からの調整力の創出指令に従い、調整力の創出計画を見直し、需要家に配分し、需要家がDERを制御し、調整力を創出する。調整力創出が終了後、アグリゲータは⑤精算により創出量、創出の失敗時のペナルティを含めた料金の分配を行う。

調整力の創出はアグリゲータが個々の需要家に創出指令を配分し、需要家が自らの責任で DER を制御し、調整力を創出する。これは需要家の DER が外部からの不要な制御の防止、アグリゲータの調整力取りまとめノウハウ／需要家の DER の運転ノウハウを担保するための機能分担である。ただし、需要家は調整力の創出中、調整力の創出状態などをアグリゲータに報告するとともに、DER の本来の運用の都合で調整力の創出量が変動した場合は、自らの責任で調整力の創出精度を確保せねばならない。なお、DER は設備種別ごとに管理するエネルギー形態が異なるが、DER の調整力の創出能力、現在値及び、調整力創出制御に関する監視制御情報はそれぞれ図 8 のように共通に表記できる。

5

需要サイドの分散型電源による 配電系統の問題対策

5.1 再エネ増設による配電系統の問題と標準化

日本の配電システムの構成のイメージを図9に示す。配電システムは地域の電力供給の最末端に位置し、発電所からの特別高圧（7,000 V 超）の電力を高圧（600～7,000 V）に変換する配電用変電所を中心に、放射状に構成された配電線網である。配電システムでは高圧受電する需要家は配電用変電所から直接接続される高圧配電線に、低圧（600 V 以下）受電する需要家は高圧配電線から柱上変圧器を介して分岐する低圧配電線に接続される。また、

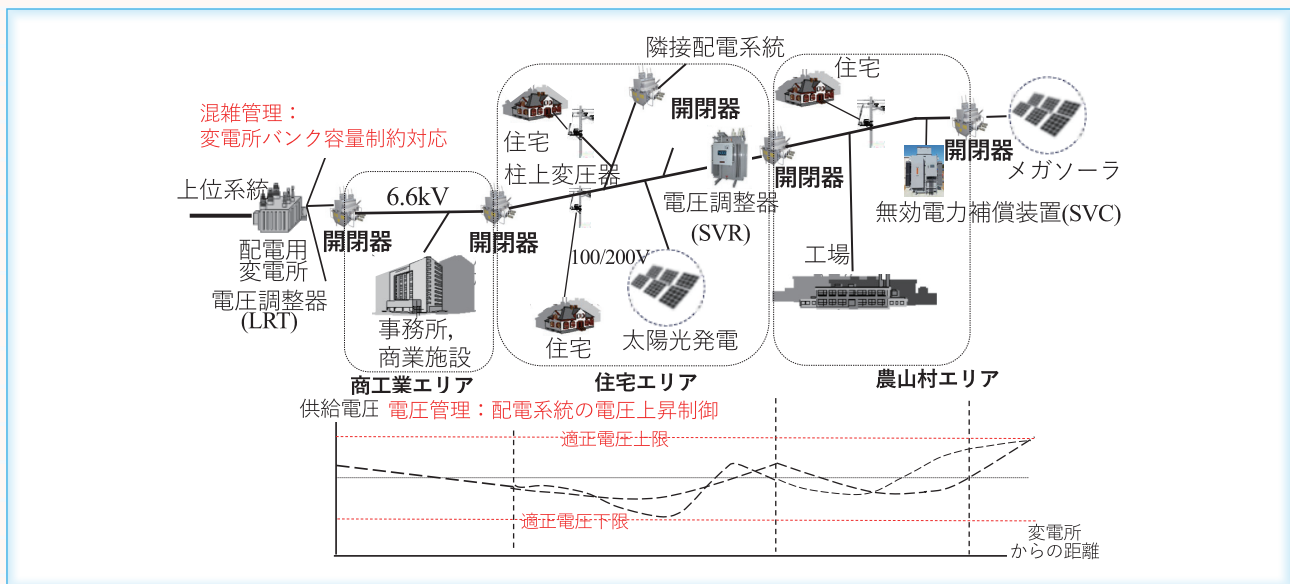


図9 日本の配電システムの構成のイメージ

表4 日本の再生可能エネルギー増設と配電系統の問題状況

	基幹系統	ローカル系統	配電系統			備考
			農山村エリア	住宅エリア	商工業エリア	
現状の再エネ増設状況	大規模再エネ設備（1MW以上）が系統に連系 送配電系統の増強、ノンファーム接続、再給電方式などが審議、制度化進行 対策費は連系協議により送配電事業者、再エネ事業者が分担		高圧系再エネ設備（50kW以上）、低圧系再エネ設備（50kW未満）導入割合ほぼ同じ 家庭用屋根置き太陽光発電（10kW未満）は導入補助と連系協議不要のため、導入拡大期待 低圧系再エネ設備一部（10kW未満）除きノンファーム接続移行 電力需要見通しに応じ送配電事業者負担で配電系統増強を実施			再エネは2010年から2020年で約10倍増加 従来、大規模設備割合多く、今後小形化
現状の混雑発生	送配電系統の空き容量により、再エネ出力制御を含め系統への連系を制御		低負荷期に発生 改修、出力制御	設備増改修などで、顕著な問題発生せず 再エネ増設で問題潜在化		発生時期、発生場所限定から、設備投資回収などから、需要家と連携が必須
現状の電圧上昇発生	—	ローカル系統の電圧上昇懸念あり	晴天、連休などの低負荷期に発生 調相設備、線路太線化 再エネの力率遠隔設定などグリッドコード見直し要			
今後の再エネ増設対策	系統増強、ノンファーム接続、再給電方式などで送配電系統運用		公平、経済的出力制御 余剰電力蓄電	需要家分散型電源の調整力をグリッドコード、市場取引で調達、運用		経済的な最適制御

配電系統は開閉器で区分され、工事、事故などの発生時に、停電区間が最小となるよう隣接配電系統と接続制御される。この配電系統の供給電圧などの電力品質は配電用変電所の負荷時タップ切換変圧器、系統上の自動電圧調整器、無効電力補償装置などの調相装置で制御されている。

現在、日本では旧電気事業者により多少の状況が異なるが、増設が進む再エネの80%以上がPVであり、その7~8割が配電系統に連系している。このため、再エネ増設による発電量の増加と、その季節などによる変化は配電系統の潮流を変化させ、配電系統の運用に影響を与え始めている。再エネ増設と問題発生状況を表4に示す。問題の発生傾向は配電系統の構成、供給エリアの電力需要、再エネの連系状態などにより異なるが、DSOの努

力により大きな問題となっていない。ただし、カーボンニュートラル実現には再エネの倍増が必要であることを考慮すると、配電系統の問題の発生は必然と考えられる。このため、DSOはセンサ付き開閉器、無効電力補償装置などの設備、配電自動化などのシステムの増改修を検討しているが、その投資回収などから、需要サイドのDERからの調整力の活用も選択肢の一つとなっている。

配電系統の問題対策には有効電力に加え、無効電力の調整力が必要である。現在、日本には配電系統の運用のための無効電力を取引する電力市場（Local Flexibility market）が存在せず、かつ無効電力を運用する分散型電源管理システム（DERMS: Distributed Energy Resource Management System）⁽⁹⁾が存在しない。ここでは、今後これらが整備されることを前提に検討する。

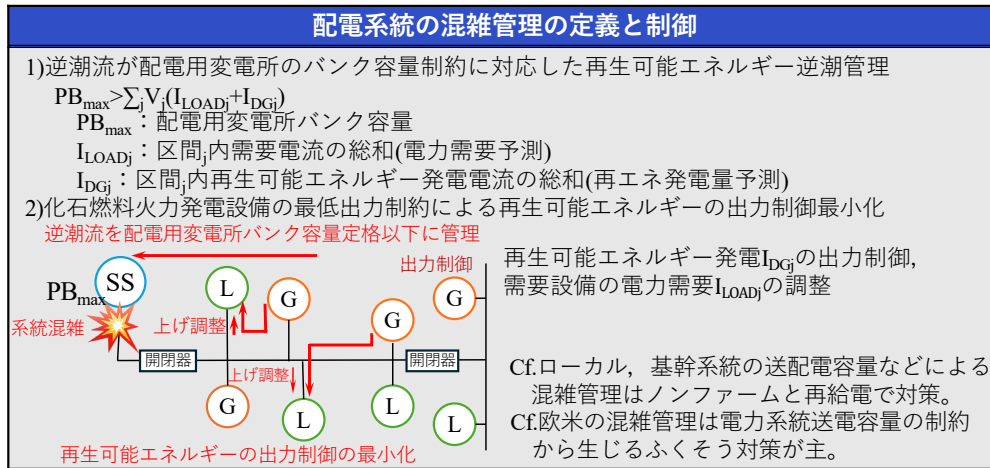


図 10 配電システムの混雑管理の定義と制御

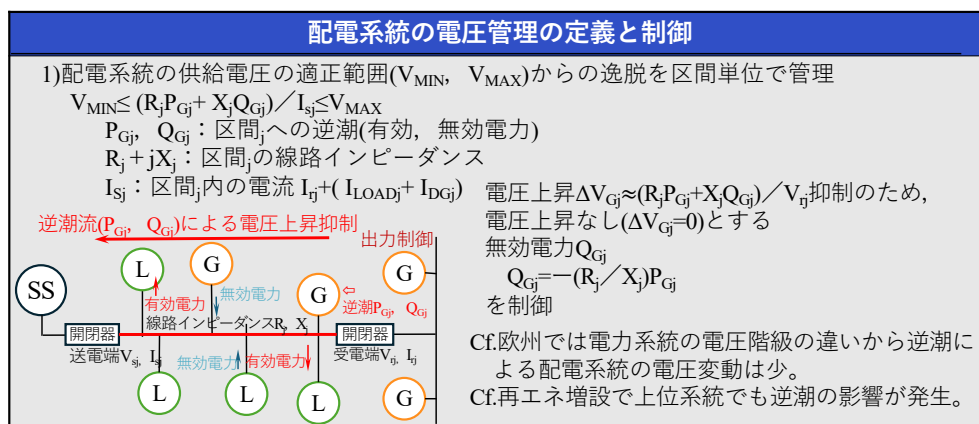


図 11 配電システムの電圧管理の定義と制御

5.2 配電システムの混雑管理の定義と制御

混雑管理は DSO が配電システムに連系する再エネ発電量、電力需要を予測し、これらによる配電用変電所バンク定格容量を超えた潮流による熱問題の発生回避のため、変電所に流入する潮流を変電所バンク定格容量以下に管理するものである。このため、DSO は電力市場を介し、蓄熱設備などの需要設備の電力需要の上げ調整、蓄電池などへの蓄電から創出される有効電力から成る調整力の調達、運用などを行うこととなる。混雑管理の定義と制御を図 10 に示す。混雑管理は調整力の調達、運用に関わる費用と変電所の増改修費用の見合いで実施される変電所の増改修により問題が解消され、その必要はなくなる。将来的に、これは配電用変電所単位の潮流管理による電力の過不足の配電系統間での融通につながり、再エネ電力の最大利用に通じる。

5.3 配電システムの電圧管理の定義と制御

電圧管理は DSO が配電システムの潮流と線路インピーダ

ンスにより生じる供給電圧の適正範囲からの逸脱を予測し、その適正化を図るものである。DER の調整力の使用は DSO 自らが所有する調相設備などの制御に対し、電力市場を介した DER の調整力の調達、運用に経済合理性がある場合に実施される。使用される調整力には電圧の制御性から無効電力を主に、有効電力が含まれる。また、使用される DER は問題の発生する配電システムに連系する力率制御などにより、無効電力の創出が可能な PV、蓄電池のパワコンなど、電力需要の上げ調整により有効電力の吸収が可能な空調機などの需要設備である。電圧管理の定義と制御を図 11 に示す。

電圧管理は、再エネ増設により配電線路に逆潮が生じる限り対策せねばならない供給電圧の制御である。

5.4 分散型電源による配電系統の問題対策の標準化

再エネ増設により配電システムに生じる問題は、混雑管理では特定の配電用変電所下の配電線路、電圧管理では配電系統の特定の開閉器で区分される区間であり、それぞ

表5 配電系統の問題対策の機能と授受情報

	制御の流れ	機能概要	共有／授受情報		特記事項
			配電事業者	アグリゲータ	
1	【情報登録】 配電系統、DER 情報登録 (情報共有 PF、電力市場)	配電事業者は配電系統、需要想定、再エネの増設見通し、アグリゲータ／需要家は 市場登録情報 （調整力取引対象 DER／調整力創出定格、制御方式、供給地点特定番号など）を登録	標準系統 、年間需要想定、再エネ発電予測情報（アグリゲータが調整力需要予測）	DER の 市場登録情報 （市場登録グループ調整力種別、定格値、取引単位、制御方式、供給地点特定番号）	配電事業者、アグリゲータ／需要家の現配電系統構成、運用は未公開。DER 連系位置は配電事業者付与供給地点特定番号
2	【系統情報】 調整力調達 必要量提示 (調整力募集)	配電事業者は配電系統の問題発生予測と対策が必要な場所にある DER（調達グループ）への調整力の 電氣的／経済的調達要件 を提示	タイムスロットごとと 調達必要情報 （調達グループの調整力種別、募集量、想定調達価格）	—	配電事業者の潮流管理情報は未公開、系統の問題発生場所、調整力必要量情報を公開
3	【電源情報】 調整力創出 可能量提示	アグリゲータ／需要家は調整力の募集に DER（調達グループ）の調整力を集約し、調整力の 提供可能量 などの情報提示	—	タイムスロットごとと 提供可能情報 （調達グループの種別ごとと提供可能量）	アグリゲータ／需要家は DER の調整力取引を DER グループ単位で実施
4	【市場取引】 調整力取引	調整力の提供対象 DER（入札グループ）による入札	調整力の 入札 DER （入札グループ）と 入札仕様 、約定結果共有	—	調達場所特定は市場で異なることを許容
5	【運用仕様】 系統運用 仕様決定	配電事業者は問題対策に必要な調整力の創出対象 DER（運用グループ）への調整力の創出指令情報を作成、指示	調整力創出対象 DER の 運用仕様 （グループの調整力創出指令情報）	—	DER グループ一括、個別制御設定選択可 力率設定時、DER 現出力量が要
6	【創出指令】 調整力の創出 制御	配電事業者は調整力の創出をアグリゲータ経由間接、自ら DERMS により直接制御	（運用グループからの調整力の創出制御自体はここでの対象外）	—	調整力創出は運用グループ、タイムスロットに従い実行
7/8	【情報更新】 更新、精算	配電事業者、アグリゲータ／需要家は制御 3~6 繰返し、精算	創出済み調整力の計量情報	調整力価格	精算は取引ごと、特定期間ごとに実施

れの場所に連系する DER が対象となる。しかし、アグリゲータは工事、事故などの対応で日々、構成が変わる配電系統の実構成の把握が不可能なため、対策が必要な配電系統の場所、そこに連系する DER の特定ができない。この対応として、DSO が DER に事前に配電系統との連系位置の識別情報（国内では供給地点特定番号）を付与し、これをアグリゲータと共有することで、アグリゲータが調整力の提供が可能な DER の配電系統の存在位置を DSO が把握でき、更に、DSO は対策に必要な配電系統の場所に連系する DER のグループをアグリゲータに指示することができる。

配電系統の問題対策の標準化の特徴は、DER のグループ管理をベースとする DER の調整力の配電系統の場所に対応した調達、運用である。更に、将来、膨大な数の DER を制御対象とするため、DER グループ管理は制御システムの実装、運用の効率化に寄与する。

DER グループ管理による配電系統の問題対策の機能と、これを実現する授受情報を表 5 に示す。ここでは日本の需給調整市場と同様に、アグリゲータが事前取引対象となる DER を市場登録する。DSO はこれを配電系統にひも付け、配電系統の問題発生予測に基づき対策が必要な場所に対応する DER グループに対し調整力を

募集、アグリゲータがこれに応える。ただし、再エネの潮流変化速度が速いため、このやり取りは「分オーダー」で行われることが想定される。更に 3~5 分程度のタイムスロットで市場取引が行われ、実需時に系統運用に必要な調整力の運用がグループ単位で行われるものとしている。この調整力の運用には DER を一括管理する DERMS の使用が選択肢としてある。

6 おわりに

再エネが主力電源化されるとき、電力の安定供給を図るには DER の調整力の活用、再エネの電力蓄積などが必要である。今後の技術開発と法制度の整備により、社会便益の最大化が図られる電力システムが実現されるものと考えられる。ここではその一つの形態を提案した。

■ 文献

- (1) IPCC, “AR6 synthesis report: Climate change 2023.” <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- (2) The 21th Session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change. <http://www.cop21.gouv.fr/en>

- (3) Global carbon project, “Global carbon budget 2022,” Nov. 2022. https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/22/files/GCP_CarbonBudget_2022.pdf
- (4) Copernicus climate change service, “The 2024 european state of the climate report.” <https://climate.copernicus.eu/>
- (5) 経済産業省, “第7次エネルギー基本計画について.” https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/
- (6) 経済産業省, “再生可能エネルギー FIT・FIP 制度ガイドブック.” https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/data/kaitori/2024_fit_fip_guidebook.pdf
- (7) European Commission, “Horizon 2020.” https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-2020_en
- (8) 電気学会電気規格調査会, “JEC 規格 電気学会テクニカルレポート JEC-TR59006 需要家電力資源のフレキシビリティのアグリゲーションによるエネルギーサービスに関する標準仕様.” <https://restservice.epri.com/publicdownload/000000003002014468/0/Product>

小林延久

1979 東北大学大学院工学研究科修士課程了。同年日立製作所に入社, 交通システム, 電力システム, 需要家エネルギー管理サービスなどの開発設計, 事業運営を担当。2016 早大先進グリッド技術研究所主任研究員, 研究院講師及び産業技術総合研究所招聘研究員を兼任, 2025 電力中央研究所客員研究員。



カーボンニュートラル実現に向けた政策動向及び標準化

今井 毅 Takeshi Imai 三菱電機

1 はじめに

気候変動問題への対策の一つとして、カーボンニュートラル（CN: Carbon Neutral）実現に向け各国で様々な取組みが進められている。我が国でも 2021 年 10 月に「2050 年カーボンニュートラル実現」に向け、2030 年度の温室効果ガス（GHG）排出量を 46 %削減することが閣議決定された。また、2025 年 2 月の第 7 次エネルギー基本計画⁽¹⁾では、2040 年度の温室効果ガス 73 %削減目標が掲げられている。この目標を達成するためには、非化石電源である再生可能エネルギー（以下、再エネ）の導入拡大が必須となる。再エネの導入拡大のためには、様々な課題を解決する必要がある。

本稿では、カーボンニュートラル実現に向けた国内外の政策動向や標準化動向について述べる。

2 国内動向

2.1 日本の目標

我が国では関係省庁により、カーボンニュートラル実現のための再エネ増設の具体的な目標が設定されている。2021 年 10 月の「第 6 次エネルギー基本計画」では、再エネを主力電源として最大限の導入に取り組むことが掲げられている⁽²⁾。2030 年に再エネ発電電力量を 3・300～3・500 億 kWh（電源構成比率 36～38 %）に向け、太陽光発電の設備容量を 2021 年比で約 1.7 倍とすることが必要である。また、2050 年のカーボンニュートラル実現に向け、2025 年 2 月に閣議決定された「第 7 次エネルギー基本計画」では、第 6 次エネルギー基本計画策定（2021 年）以降の状況変化を踏まえ、エネルギー安定供給や脱炭素化に向けたエネルギー構造の転換、経済成長につなげるための産業政策が強化され、再エネの主力電源化に向けた計画が掲げられている。

これらの目標実現に向け、ノンファーム接続、再給

電、N-1 電制（単一設備故障発生時に瞬時に発電を制限することで、平常時に運用容量を超える送電電力を許容する方式）、同時市場などの施策が進められている。また、再エネ増設時の電力システム全体の需給バランス確保のため、再エネの出力制御のあり方や系統連系要件の審議が実施されている。

しかし、今後の配電系統へ太陽光発電等の変動性再エネが大量に設置されることで、必要と考えられる配電系統の混雑管理や電圧管理に関する政策審議は緒についた段階である。

2.2 再生可能エネルギーの主力電源化の取組み

経済産業省（以下、経産省）では、国民負担の抑制と地域との共生を図りながら、安全性（Safety）を大前提とし、自給率（Energy Security）、経済効率性（Economic Efficiency）、環境適合（Environment）を同時達成するべく「S+3E」を前提に各種の取組みが進められている。

2023 年 4 月に「再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議」が開催され、再エネの導入拡大に向けた関係府省庁連携アクションプランが策定された⁽³⁾。また、再エネ大量導入とレジリエンス強化に向けた「広域系統長期方針（広域連系系統のマスタープラン）」を 2023 年 3 月に策定、2023 年 4 月からローカル系統におけるノンファーム型接続が開始された⁽⁴⁾。脱炭素社会の実現に向けた電気供給体制の確立を図るため、電気事業法等の一部を改正する「GX 脱炭素電源法」が 2023 年 5 月に成立した。

2.3 審議会／委員会等の概況

カーボンニュートラル実現に向けた再エネ主力電源化に向け、様々な課題解決のための検討を行っている審議会、研究会等の概況を表 1 に示す。

表 1 経済産業省、OCCTO におけるカーボンニュートラル実現に関する政策審議状況

審議体名	審議事項と目標	審議状況／結果	対象		
			送電系統	配電系統	需要家 電力資源
GX実行会議	クリーンエネルギー移行のための変革（GX）	GX2040ビジョン、エネルギー基本計画、地球温暖化対策計画に向けた検討を実施。	○	－	△
総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会	エネルギー政策に関する政策提案	GX推進法、脱炭素源法の実行に必要な脱炭素電源への転換などの今後のエネルギー政策に向けた検討。	○	－	○
電力・ガス基本政策分科会 再エネ大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会	エネルギー基本計画を踏まえ、系統新・増設、既存系統の有効活用を検討。透明性、公平性の確保。	系統混雑緩和のためノンファーム型接続全国展開。2021年1月空き容量無い基幹系統、2022年度末ローカル系統受付開始。先着優先からメリットオーダーへの転換政策として再給電方式を2022年開始。再生可能エネルギーの主力電源化に向けた検討。	○	△	－
電力・ガス基本政策分科会 系統ワーキング	接続可能量算定及び出力制御の公平性確保ルール整備	系統制約による出力制御見通しと対策（新設火力最低出力引き下げ）、系統蓄電池による混雑解消などを審議、提案。	○	－	△
OCCTO グリッドコード検討会	再エネ大量導入に対応するグリッドコード検討、一般送配電事業者の「系統連系技術要件」の個別技術要件整備、他規定整合。	電源、蓄電、需要設備など個別要件検討。フェーズ2(2024年3月)検討を終了。フェーズ2'として蓄電池の導入状況や最新の知見を踏まえ、2030年を待たずに要件化が必要と考えられるものについて審議中。	○	－	△

2.3.1 GX 実行会議

再エネの導入拡大に伴い、蓄電池等の活用や、需給ひっ迫時等に適切な電力融通等を可能とする柔軟な電力システムを構築する必要がある。2022年8月のGX実行会議で、定置用蓄電池の導入促進と電力系統整備方針が示された。2024年7月及び8月にGX2040リーダーズパネルが開催され、目標に向けた様々な取組みが検討された。これらの取組みは、GX2040ビジョンや第7次エネルギー基本計画と整合を取って推進される。

2.3.2 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会

経産省の「総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会」では、エネルギー政策をめぐる動向を踏まえて議論が行われている。2022年9月に、エネルギー安定供給の再構築に向けた取組み項目における対応及び中長期の対応方針が示された⁽⁵⁾。エネルギー自給率の向上を図りながら、脱炭素とエネルギー安定供給の両立に向けた取組みを加速させていくための具体的な方策の検討が進められている。2040年度エネルギーミックスに向けた検討の方向性について、有識者ヒアリング等を行い実現シナリオの検討が進められている。また、持続可能な電力システム構築小委員会では、2022年1月に「第三次中間取りまとめ」⁽⁶⁾が策定された。

2.3.3 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会

資源エネルギー庁（以下、エネ庁）の「再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会」では、再エネの大量導入とそれを支える次世代電力ネット

ワークの在り方について検討が進められており、ローカル系統へのノンファーム接続、脱炭素型の調整力（揚水・系統用蓄電池）等について方向性が示された⁽⁷⁾。また、将来の市場主導型の導入等に向け、電力系統の準備を整えた上で、混雑発生時に市場の入札情報などを基に混雑処理を行うノードル制の検討の必要性も示された⁽⁸⁾。2024年11月の本委員会において、「再エネ主力電源化アクションプラン（案）」⁽⁹⁾が示された。

2.3.4 次世代の分散型電力システムに関する検討会

経産省の「次世代の分散型電力システムに関する検討会」では、分散型リソースの価値発掘、価値評価、補完共存した分散型システムの構築について、一般送配電事業者、アグリゲータの取組みや分散型リソース活用における国内外の課題の確認と詳細検討が進められている。需給調整市場における機器個別計測、低圧リソースの活用について、2026年度の開始を目指して検討が進められている⁽¹⁰⁾。

2.3.5 新エネルギー小委員会 電力・ガス事業分科会電力・ガス基本政策小委員会系統ワーキンググループ

経産省の「新エネルギー小委員会 電力・ガス事業分科会電力・ガス基本政策小委員会系統ワーキンググループ」では、再エネの接続可能量の算定及び出力制御の公平性確保ルールの整備について検討が進められている。再エネ出力制御の抑制に向けた取組みとして、新たな「出力制御対策パッケージ」が2023年12月に取りまとめられ、系統増強等により、再エネ導入拡大やレジリ

表 2 グリッドコード検討会でフェーズ分けされた課題

フェーズ	時期	項目
フェーズ1	2023年4月要件化完了	早急に対策が必要と考えられる要件 適切な出力制御、需給変動・周波数変動への対応、電圧変動への対応等
フェーズ2	2030年4月要件化予定	再エネ(発電電力量)導入比率36～38%程度を想定し、適切な出力制御や変動対策などに貢献する要件
フェーズ2'	2030年前に要件化	蓄電池の導入状況や最新の知見を踏まえ、2030年を待たずに要件化が必要と考えられるもの
フェーズ3	2030年前後に要件化	再エネ比率50～60%程度を想定し、調整力・慣性や系統の保護・制御に貢献すると考えられるため、2030年前後に要件化するもの
フェーズ4	検討時期を設定する	カーボンニュートラル実現に向け、要件化時期は決めないものの、新規技術や新制度なども意識した主に小容量火力や高低圧に関して要件化するもの

表 3 グリッドコードに関係する国内外の政策及び市場動向

	対象	国内関係審議会	国内 Grid Code (系統連系要件)	欧州 Electricity network codes	米国 Grid Code
方針・戦略 制度・規制	再エネ導入 電力市場	GX実行会議(クリーンエネルギー移行) 2050年カーボンニュートラルを見据えた次世代エネルギー 需給構造検討小委員会*(クリーンエネルギー戦略) 基本政策分科会*(第7次エネルギー基本計画) 電力・ガス基本政策小委員会*、制度検討作業部会 (小売事業者、電力ネットワーク次世代化資金支援、出力 抑制、容量市場、ベースロード市場)	電気設備に関する技 術基準を定める省令	<Clean energy package> EU Directive 2001 (Renewable energy, 2018) EU Directive 944 & EU Regulation 943 (Market rules, 2019)	FERC Order NERC Standards
HV 500kV 275kV	【大規模電源】 火力、水力、 原子力発電 広域連携(HVDC) 【需要家資源】 データセンター	再エネ大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会* (海底直流送電、ノンファーム型接続) 水素・アンモニア政策小委員会/資源・燃料分科会* (水素基本戦略) OCCTO広域系統整備委員会(広域連携) OCCTOグリッドコード検討会(フェーズ1 再エネ対応)	送配電等業務指針 (OCCTO)	EU Regulation 631 RfG (grid connection of generators, 2016) EU Regulation 1447 HVDC (2016)	FERC Order, NERC Standards (発 電設備接続)
MV 154kV 77, 66kV 33, 22kV	大規模PV、Wind、 蓄電池 【需要家資源】 ビル、工場 CHP(コジェネ) Heat Pump (空調、蓄熱) 充電ステーション	系統ワーキンググループ(出力抑制、コネクト&マージ、系 統用蓄電池) 局地的電力需要増加と送配電ネットワークに関する研究 会(データセンター、EV充電) OCCTO広域系統整備委員会(ノンファーム型接続、再給 電方式) OCCTOグリッドコード検討会(フェーズ1, 2, 3, 4)	電力品質確保に係る 系統連系技術要件ガ イドライン(特別高圧)	EU Regulation 631 RfG (grid connection of generators, 2016) EU Regulation 1388 DC (Demand Connection, 2016) EN 50549-2	IEEE P2800
LV 6.6kV 110V	【需要家資源】 一般家庭 PV、蓄電池、 燃料電池、給湯器、 空調、照明、EV	次世代の分散型電力システムに関する検討会(機器個別計 量、低圧リソース)、EVグリッドWG OCCTOグリッドコード検討会(フェーズ2'、3、4)	電力品質確保に係る 系統連系技術要件ガ イドライン(高圧、低 圧)	EU Regulation 631 拡張中 (V2G) EU Regulation 1388 拡張中 (V1G, Heat Pump) EN 50549-1	IEEE 1547

電圧階級区分 海外もほぼ同じ * 経済産業省 総合資源エネルギー調査会

エンス強化を行う対策が検討された⁽¹¹⁾。本委員会では、引き続き、再エネ出力制御の実施状況・課題と新たな「再エネ出力制御対策パッケージ」の進捗について確認が行われている⁽¹²⁾。

2.3.6 グリッドコード検討会

電力広域的運営推進機関(OCCTO: Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operators)の「グリッドコード検討会」では、系統連系技術要件に対応した具体的な個別技術要件の検討を進めており、再エネを大量導入するために必要となるグリッドコードの整備を目的として、表2に示すフェーズ分けされた課題に対応して段階的な検討が進められている。

フェーズ2までの検討は終了し、第18回検討会ではフェーズ分けの見直しが行われ、2030年を待たずに要件化が必要と考えられるものが「フェーズ2'」として

新たに設定された⁽¹³⁾。グリッドコードに関係する国内審議会と海外の取組みの対応を表3に示す。

2.3.7 局地的電力需要増加と送配電ネットワークに関する研究会

2024年3月に電力・ガス取引監視等委員会の研究会として設置された「局地的電力需要増加と送配電ネットワークに関する研究会」では、送配電ネットワークが局地的需要増加を機動的かつ円滑に受け入れるための課題や方策を整理すべく検討が行われた。2024年6月に「局地的電力需要増加と送配電ネットワークに関する研究会報告書」がまとめられた⁽¹⁴⁾。この中で、今後検討を深めることが考えられる事項として下記が報告されている。

① 託送料金制度

- ・新たな時間帯別託送料金の導入の是非(2028年度以降)

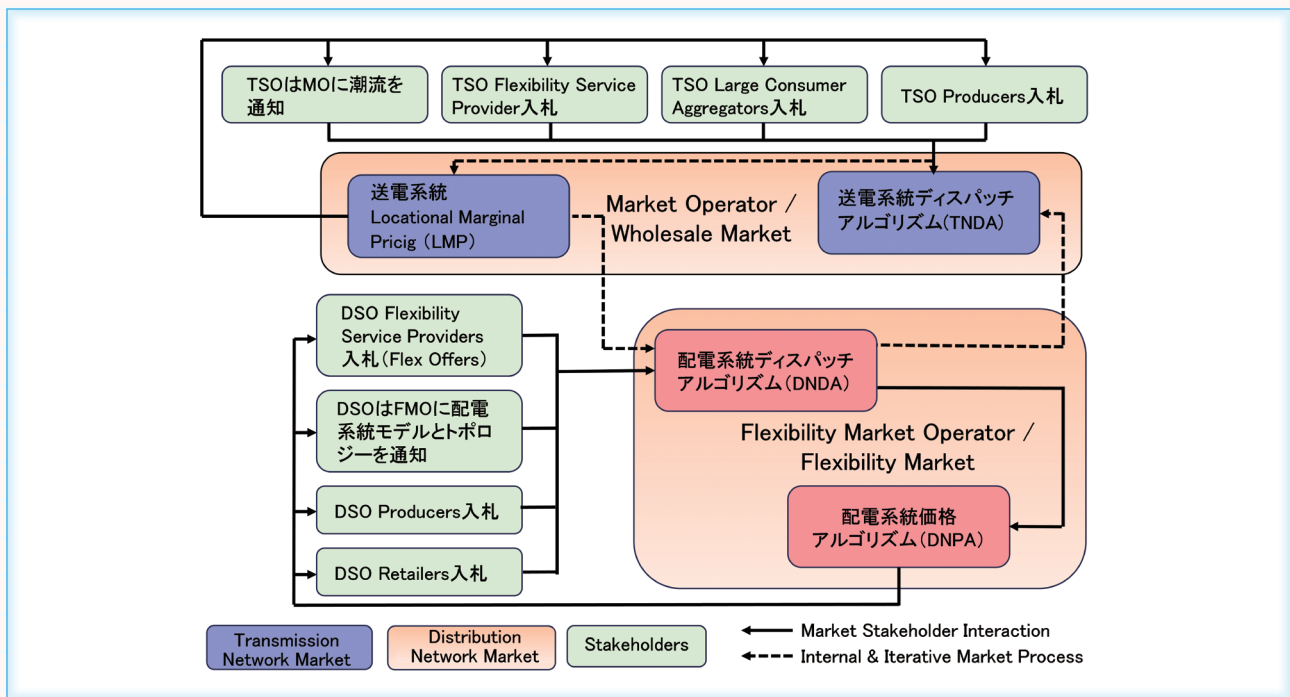


図 1 FLEXGRID システム構成

- ・脱炭素電源地域への需要立地インセンティブ
- ② リソースのコントロール
 - ・遠隔制御が実施可能な仕組み・環境の検討
 - ・需給調整市場等への低圧リソースの参入
 - ・潮流制御用 DR 等の活用
- ③ 迅速な接続が可能な地点への誘導
 - ・ウェルカムゾーンマップの開示
 - ・一般送配電事業者とユーザ・誘致主体の連携
- ④ 計画的な送配電ネットワーク整備
 - ・事業計画策定時のステークホルダーとの協議
 - ・プッシュ型送電線整備の託送料金審査上の整理
- ⑤ 新規需要の接続による影響緩和
 - ・電圧変動対策、実証事業支援、調相設備設置支援等

3 海外動向

3.1 欧州の動向

欧州では PV（太陽光発電）や風力発電等の再エネ導入が進んでおり、需要家側の電力資源を活用したフレキシビリティの利用に関する技術開発、システム構築、関連する国際標準化の取組みも欧米が先行している。

アグリゲータ、送配電事業者、及び電力市場の連携に関しては USEF (Universal Smart Energy Framework)⁽¹⁵⁾、アグリゲータと電力資源を提供する需要との連携に関しては OS4ES (Open System for Energy Services) プロジェクトが共通の情報モデル・通信インタフェース仕様を作成し、欧州の調整力

(Flexibility) の管理のための標準としてまとめられた、USEF では配電システムの混雑管理のために、配電システム運用者 (DSO) とアグリゲータの間での Flexibility 取引市場が提案されている⁽¹⁶⁾。

配電システムの混雑管理のため、欧州では Piclo Flex (英国)、NODES (北欧)、豪州では deX などの Local Flexibility Market が導入、運用されている。Piclo Flex は配電システム運用者、VPP アグリゲータ、蓄電池／EV 事業者などが取引を行うためのプラットフォームを提供しており、英国だけでなく欧州や北米にも展開している⁽¹⁷⁾。

欧州の Horizon 2020 プロジェクトでは、今後の電力システムとして、卸電力市場、Local Flexibility Market、TSO (Transmission System Operator、送電システム運用者)、DSO (Distribution System Operator、配電システム運用者)、アグリゲータを統合・最適化したシステムの開発・実証が行われている。代表的なプロジェクトとして、NODES をベースにした統合電力市場の実証プロジェクトである FLEXGRID が進められている⁽¹⁸⁾。FLEXGRID のシステム構成を図 1 に示す。FLEXGRID は、以下を目的としている。

- ① エネルギー市場と送電網運用の間の相互作用改善
- ② DSO と TSO がフレキシビリティを利用して設備投資を削減するためのメカニズム改善
- ③ スマートグリッド・エコシステムの利害関係者のための持続可能なビジネスモデルの調査
- ④ エネルギー部門の利害関係者のエネルギーサービ

ス取引、動的な相互運用の促進

このシステムは、卸電力市場、系統運用、配電市場 (Local Flexibility Market), 配電運用に対して Flexibility を最適に運用し、需要家にも満足を与える最適な電力システムを目指している。また、卸電力市場、配電市場は自動化されたリアルタイム市場とし、送配電系統と Flexibility の提供状況に応じた送配電系統の地点ごとに価格を決めるものとしている。FLEXGRID の実現のためには制度などの大幅な変更が必要であるが、ENTSO-E や欧州委員会などで検討された将来の電力システムの姿を具体的に示すものとなっている。

3.2 米国の動向

米国の再エネ導入については、風力発電及び太陽光発電が目覚ましい伸びを示している。2016 年の再エネの内訳は、風力発電が発電設備容量で 61 %, 発電電力量で 63 % と圧倒的シェアを占め、2020 年における風力発電設備容量は 122 GW に達した。太陽光及び太陽熱発電は、再エネの中のシェアが 2016 年にそれぞれ 26 %, 15 % を占めており、2020 年の太陽光発電設備量は 95 GW に達した。再エネ促進支援策として、連邦レベルでは発電電力量に応じて連邦法人税が控除される発電税額控除や、投資額の一定比率が連邦法人税から控除される投資税額控除などの優遇税制が挙げられる。

州レベルでは、供給電力の一定割合を再エネ電力で賄うことを義務付ける「再生可能エネルギー利用割合基準制度」(RPS: Renewable Portfolio Standard) が再エネの利用拡大に貢献している。州レベルのもう一つの主

要支援策として、家庭や企業の再エネの自家発電余剰電力を、電気事業者が小売料金の価格で買い取るネットメータリング制度がある。本制度は 2017 年 11 月時点で、38 州及びワシントン D.C. で導入され、太陽電池パネルの価格低下と相まって、住宅の屋根置き太陽光発電の設置増大に寄与している。

しかし、再エネ自家発電の急激な増大により、電気事業者側に配電費用の回収不足や売上げ減少等の問題が顕在化してきたため、一部の州で余剰電力の買取価格の引下げや再エネ自家発電需要家向けの基本料金の引上げが実施されている。

4 標準化動向

再エネの大量導入に伴い、配電系統への影響が想定されるため、ここでは配電系統や需要家側に関連する IEC 規格について述べる。配電系統に関連する IEC 規格を図 2 に示す。

IEC TC57 (Power systems management and associated information exchange) は、発電/系統運用/電力市場、送電/配電に対応する規格策定を進めている。WG13 では、系統運用のための規格として IEC 61970 (EMS-API: Energy Management System-Application Program Interface) を策定している。WG14 では、配電管理システムのための IEC 61968 (Application integration at electric utilities -System interfaces for distribution management) を策定した。WG10 は、送電・配電における変電所自動化システム

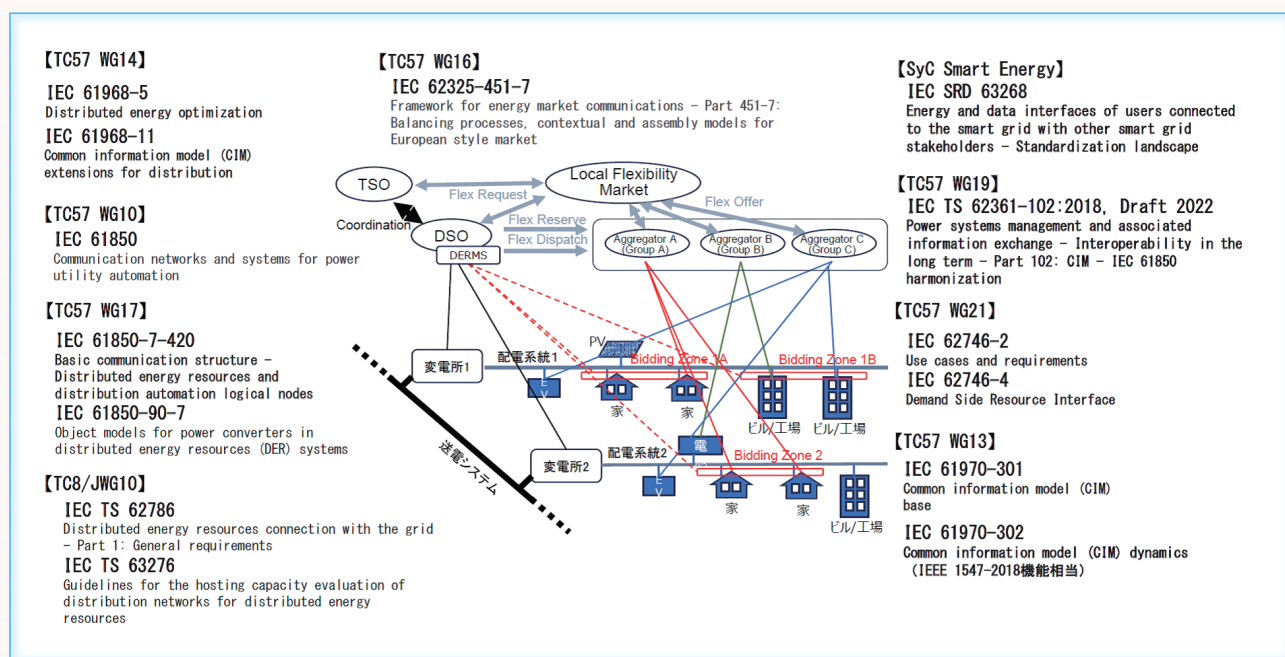


図 2 分散型電源のグループ管理による配電系統の混雑、電圧管理に関する IEC 標準

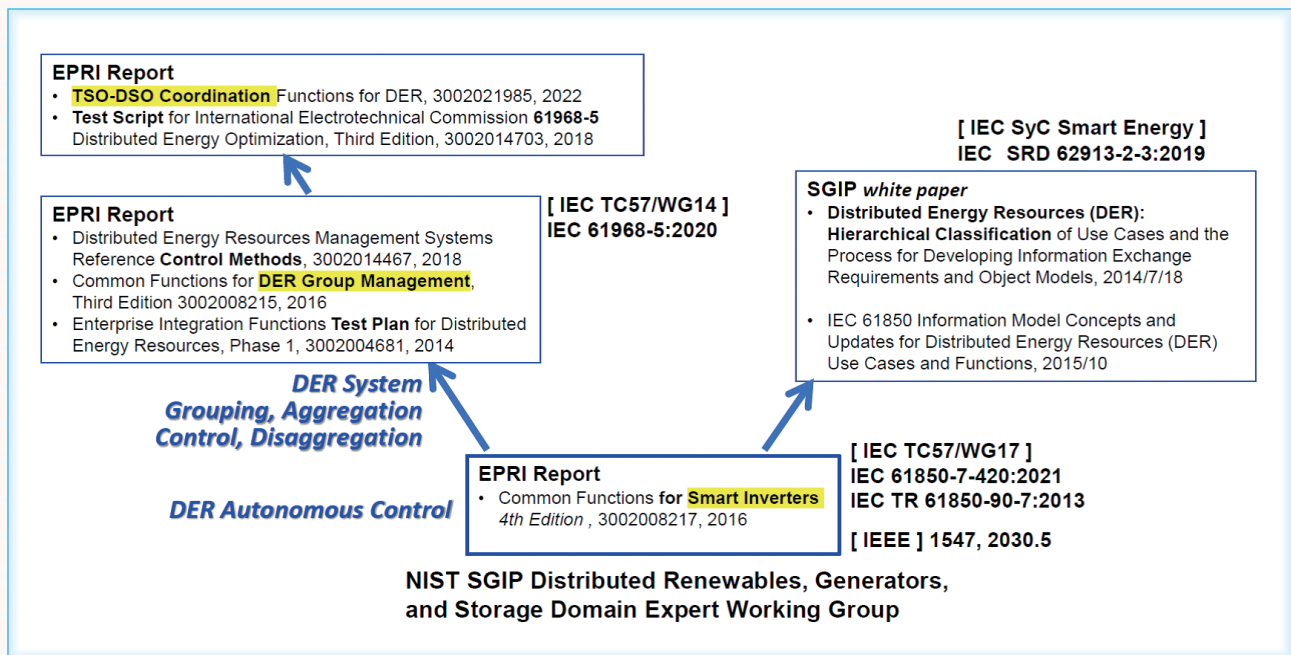


図3 Smart Inverter, DERMS に関する米国の活動状況

のための IEC 61850 (Communication networks and systems for power utility automation) を策定している。WG16 は、市場取引関連の規格である IEC 62325 (Framework for energy market communications) を策定している。WG21 は、系統側と需要家側のエネルギーマネジメントシステムとのインタフェースを定めた IEC 62746 (Systems interface between customer energy management system and the power management system) を策定しており、2024 年 12 月に需要家側との CIM プロファイルを規定した IEC 62746-4:2024 が発行された。

システム全体に関連するものとして、WG19 は相互運用性に関連する規格の策定を進めており、IEC TS 62361-102:2018 (Power systems management and associated information exchange-Interoperability in the long term-Part 102: CIM-IEC 61850 harmonization) を策定した。また、IEC SyC Smart Energy は、スマートグリッドに接続しているステークホルダー間のインタフェースをまとめた IEC SRD 63268:2020 (Energy and data interfaces of users connected to the smart grid with other smart grid stakeholders-Standardization landscape) を策定した。

図3に米国の取組みと関連する IEC 規格の関係を示す。

配電システムの高度化については、2016 年 12 月に米国 EPRI (Electric Power Research Institute) が“Common Functions for Smart Inverters”を発行し、2018 年 12 月に“Distributed Energy Resources

Management Systems Reference Control Methods”を発行した。本 EPRI レポートは、DERMS (Distributed Energy Resource Management System) が、DER (Distributed Energy Resource) 及び複数 DER のグループ制御を行う制御方法について記載されている。本仕様をベースに分散型エネルギーの最適化を行う規格として、IEC 61968-5 (Application integration at electric utilities-System interfaces for distribution management-Part 5: Distributed energy optimization) が 2020 年 8 月に発行された。

また、IEEE ではスマートインバータの仕様として IEEE 1547 (IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces) が策定された。本仕様をベースに、TC57 WG17 では IEC 61850 の論理ノードを分散電源に拡張した IEC 61850-7-420 を策定した。IEC TR 61850-90-7 は、インバータ機能を有する DER (太陽光発電システム、蓄電池システム、EV 充電システムなど) の機能が記載されている。そのほか、Smart Energy Profile 2.0 (SEP2.0) と呼ばれるスマートデバイスとグリッド間の通信を定義する規格として IEEE 2030.5 を策定した。

5 おわりに

2050 年のカーボンニュートラル実現に向け、国内外の政策動向や市場動向について示した。国内ではローカル系統までの検討が進められているが、配電系統への再

エネの大量導入拡大に伴い配電系統での対策の必要性が高まりつつある。今後、配電系統における課題解決のため、需要家電力資源の調整力活用の必要性が増し、国内外の政策動向やフレキシビリティ活用の先進事例も考慮した技術検討や標準化の重要性が高まると考える。

謝辞 本研究は、電気学会「スマートグリッドの電気事業者・需要家間エネルギーサービス技術調査専門委員会」委員各位の御協力と経済産業省の国際標準化事業の御支援によるものである。関係各位に感謝致します。

■ 文献

- (1) 資源エネルギー庁, “第7次エネルギー基本計画,” 2025年2月18日.
- (2) 資源エネルギー庁, “第6次エネルギー基本計画,” 2021年10月18日.
- (3) 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議, “「GX実現に向けた基本方針」を踏まえた再生可能エネルギーの導入拡大に向けた関係府省庁連携アクションプラン,” 2023年4月4日.
- (4) 電力広域的運営推進機関, “広域系統長期方針（広域連系系統のマスタープラン）,” 2023年3月.
- (5) 資源エネルギー庁, “エネルギーの安定供給の再構築,” 2022年9月28日.
- (6) 資源エネルギー庁, “総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 持続可能な電力システム構築小委員会第三次中間取りまとめ,” 2022年1月.
- (7) 資源エネルギー庁, “次期エネルギー基本計画の策定に向けたこれまでの議論の整理（再生可能エネルギー関係）,” 2024年11月28日.
- (8) 資源エネルギー庁, “電力ネットワークの次世代化に向けた中間とりまとめ,” 2021年9月.
- (9) 経済産業省, “再エネ主力電源化アクションプラン（案）,” 2024年11月28日.
- (10) 資源エネルギー庁, “需給調整市場について,” 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 制度検討作業部会（第75回）, 2023年1月27日.
- (11) 資源エネルギー庁, “再生可能エネルギーの出力制御の抑制に向けた取組等について,” 新エネルギー小委員会 電力・ガス基本政策分科会 系統ワーキンググループ, 2023年12月6日.
- (12) 資源エネルギー庁, “再生可能エネルギーの出力制御の抑制に向けた取組等について,” 新エネルギー小委員会 電力・ガス基本政策分科会 系統ワーキンググループ, 2024年5月24日.
- (13) 電力広域的運営推進機関, “2025年度以降の要件化候補～フェーズ分類の考え方～,” グリッドコード検討会, 2024年11月7日.
- (14) 資源エネルギー庁, “局地的電力需要増加と送配電ネットワークに関する研究会報告書,” 局地的電力需要増加と送配電ネットワークに関する研究会, 2024年6月.
- (15) USEF, “THE FRAMEWORK EXPLAINED,” 2021年5月25日.
- (16) USEF, “USEF Flexibility Trading Protocol Specifications,” (Revision 1.01), 2020年1月28日.
- (17) Piclo Flex, <https://picloflex.com/>
- (18) FLEXGRID, “The overall FLEXGRID architecture design, high-level model and system specifications,”

今井 毅

三菱電機株式会社知的財産センター 知財戦略部。1985-04 三菱電機株式会社入社。通信システムの研究・開発。2010 からスマートグリッドの標準化に従事。



ECHONET Lite 及び ECHONET Lite Web API のエネルギー分野での活用

佐方 連 Ren Sakata (株) 東芝

1 はじめに

近年、地球温暖化防止やエネルギー安全保障が社会課題となっており、これらに対応する日本のエネルギー政策として政府は2025年2月に第7次エネルギー基本計画を閣議決定した⁽¹⁾。この計画の中では、再生可能エネルギーや原子力を最大限導入・活用して、脱炭素とエネルギー安全保障を図ること、特定の電源や燃料源に過度に依存しないようバランスの取れた電源構成を目指すことやZEH (Net Zero Energy House)⁽²⁾ 基準の住宅の推進などを掲げている。

これらの中でも、特に、DR (Demand Response) に関する記述は興味深い。一部の再生可能エネルギーは、例えば太陽光発電であれば日射量に、風力発電であれば天候により発電量が左右され、電力供給量の変動する。すると需要との差異が生じて電力ネットワークの安定性が損なわれる。この対策として、家庭など需要家側に置かれた蓄電池等を調整力として用い、電力供給が不足した場合は放電、過多の場合は充電する働きをさせることをDRと呼び、第7次エネルギー基本計画でも触れられている。このように電力を蓄え、放出することが可能な、家庭等に置かれた蓄電池、ヒートポンプ給湯機、コージェネレーションやEVなどの機器・設備はDER (Distributed Energy Resources) と呼ばれる。DRとは、通信ネットワークを介して外部から指示を与えてDERを遠隔操作するなどの手段により、需要家側の機器・設備を調整力として働かせることを言う。また、DER機器がDRに対応可能となった状態を「DRready」と呼ぶ⁽³⁾。第7次エネルギー基本計画の中では、各家庭にある膨大な数のDERをDRready化することや、それらを用いたDRの実証を行うと述べている。また「RA (Resource Aggregator)」と呼ばれる事業者が大規模な調整力を供出するために、多数のDER機器を束ねて制御するアグリゲーションビジネスも促進

するとしている。

一方、一般社団法人エコーネットコンソーシアムはこれまで、家庭内のセンサ類、白物家電、設備系機器など省リソースの機器をIoT化し、エネルギーマネジメントやリモートメンテナンスなどのサービスを実現するため、「ECHONET Lite⁽⁴⁾」と呼ばれる通信規格を定めてきた。ECHONET Liteは、通信仕様や各機器の制御コマンドを共通化することで、マルチベンダ環境でのシステム構築の実現を目指している。現在、スマートメータ、エアコン、ヒートポンプ給湯機、そして蓄電池など数多くの機器に搭載されている。更にインターネットなどに代表されるようなサイバー空間における取組みとして、DRなどのためにサービス事業者がインターネットを経由して家庭内の機器を制御する「ECHONET Lite Web API⁽⁵⁾」の整備も進めている。

これらの仕組みは、上述した新たなエネルギー政策の中での様々な場面で活用が期待される。筆者はエコーネットコンソーシアムの企画運営委員長を務めており、本稿ではコンソーシアムの定める通信規格や社会展開について概説する。まず、ECHONET LiteやECHONET Lite Web APIについて説明し、続いて次世代スマートメータ、DRreadyやVPP (Virtual Power Plant) における活用について述べる。

2 ECHONET Lite の特長と実績

エコーネットコンソーシアムは図1に示すように、ECHONET Liteを用いて家庭内の機器を互いに接続するECHONET 1.0と、ECHONET Lite Web APIを用いてサイバー空間上のサービスを連携させるECHONET 2.0の規格策定と普及を活動の柱としている⁽⁶⁾。

ECHONET Liteを用いると、スマートメータ、スマートフォンやHEMS (Home Energy Management System) コントローラを、家庭内のWi-Fiなどを介し

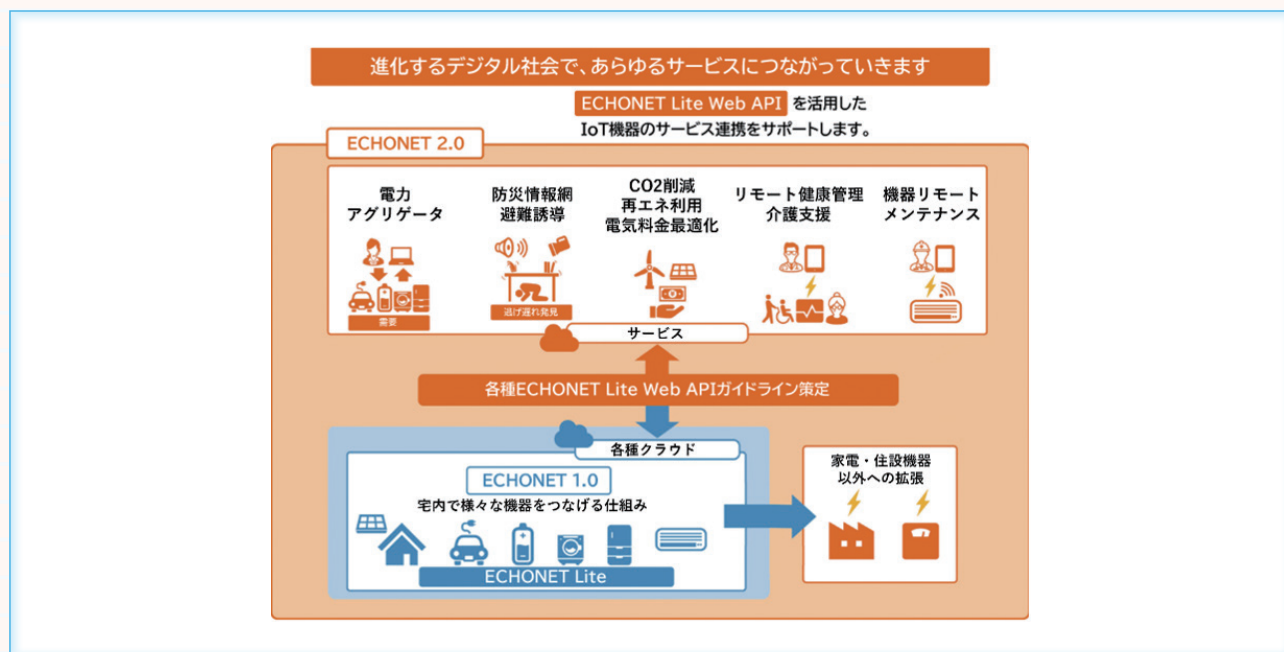


図 1 エコーネットコンソーシアムが目指す世界⁽⁶⁾

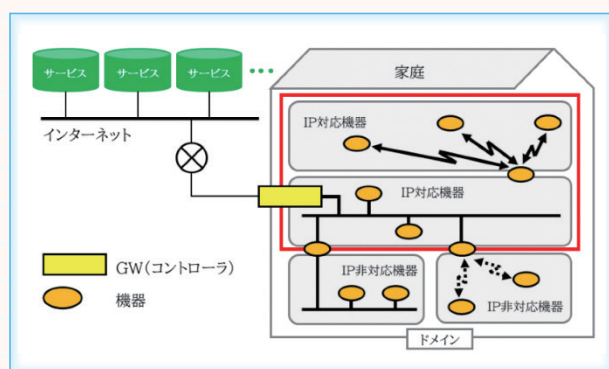


図 2 ECHONET Lite を用いたシステム構成例⁽⁴⁾

てエアコンや照明などと接続することができ、電気代の把握や機器の制御が可能となる。ECHONET Lite を用いて各機器が使用する通信仕様や制御コマンドを共通化すれば、複数のメーカーが混在するマルチベンダ環境であっても、システム構築が容易となる。2012 年 2 月に経済産業省が設置したスマートハウス標準化検討会において、ECHONET Lite は HEMS における公知な標準イ

ンタフェースとして推奨された⁽⁷⁾。2023 年度末までに ECHONET Lite を搭載した機器の累計出荷台数は 1 億 4,986 万台に達した。これらを活用して価値あるエネルギーサービスやスマートホームサービスを展開することが期待される。

ECHONET Lite は、図 2 のシステム構成例に示すように、インターネット上の各種サービスと家庭内の機器との間に、ゲートウェイ機能を持つコントローラなどの機器があるアーキテクチャを前提としている。コントローラなどをサイバー空間と接続することで、家庭などの外からでも家庭内の機器を操作できるようにしている。

ECHONET Lite が規定する範囲は、図 3 に示すとおり、OSI 参照モデルにおける第 5 層以上である。各機器が共通して使うべき通信プロトコルや通信手段を定めた ECHONET Lite 規格、機器をモデル化した機器オブジェクト詳細規定、そして機器の種類ごとに固有の通信手順などをまとめたアプリケーション通信インターフェー

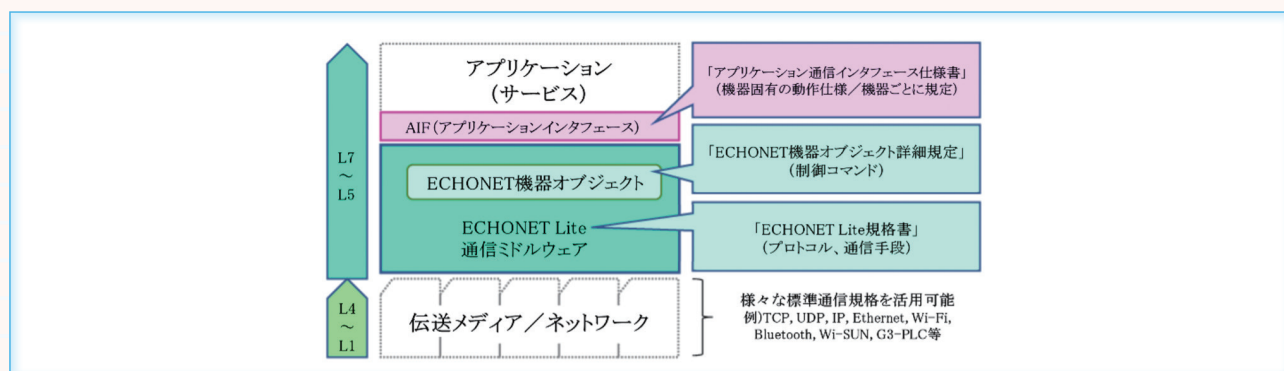
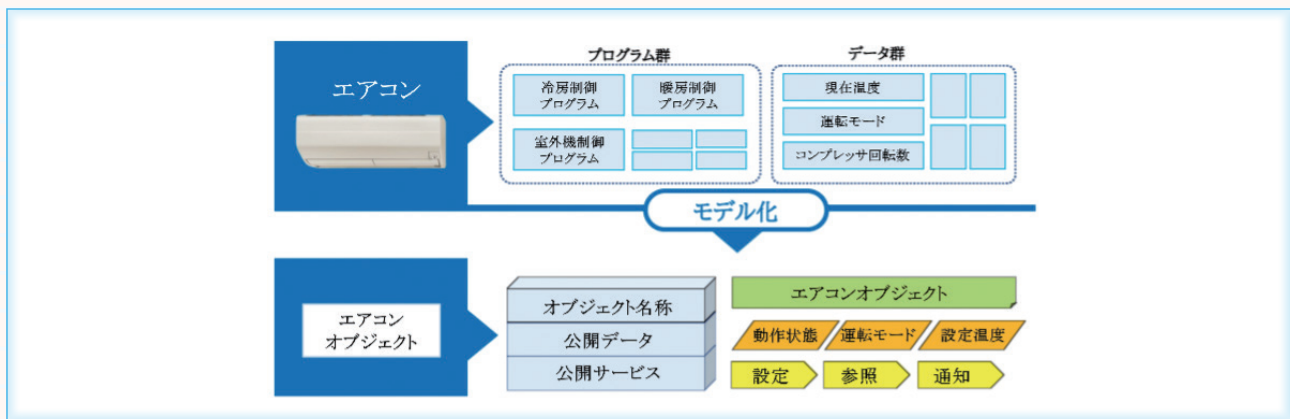


図 3 ECHONET Lite を構成する規格群⁽⁴⁾

図4 機器オブジェクト定義の例⁽⁴⁾

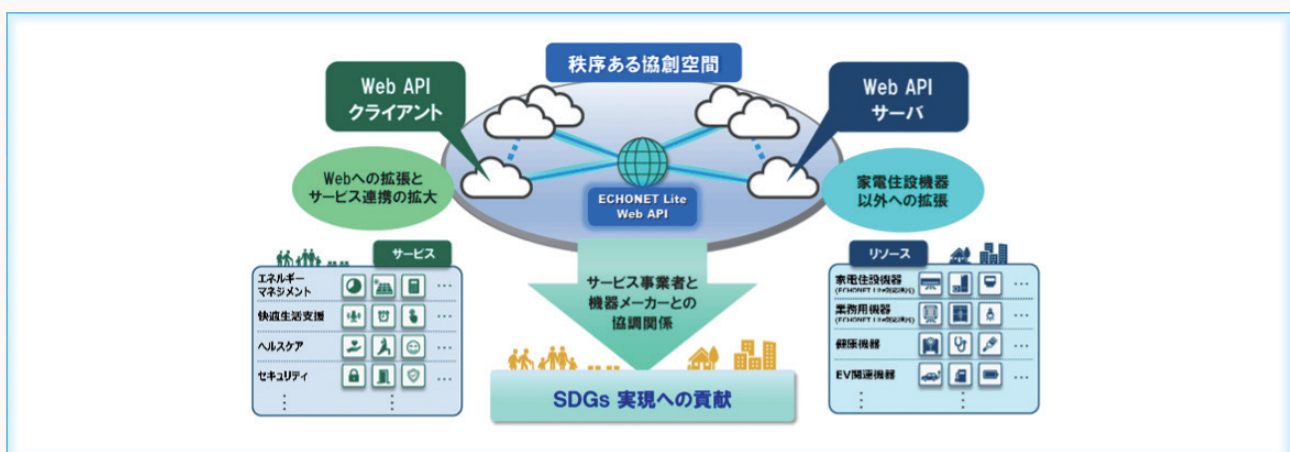
ス（AIF: Application InterFace）仕様から構成される。なお、下位の通信仕様には依存しないため、サービスやアプリケーションなどの様々な要件に基づいて、市場からリーズナブルな伝送メディアを選択することが可能である。

機器オブジェクトとは、図4に示すように様々な機器が持つ多様なプログラム群やデータ群をモデル化したものである。具体的には、エアコンなどの機器の種別を「オブジェクト名称」、動作状態・運転モードなど各々の機器が持つ情報や機能を「公開データ」、各機能の操作方法を「公開サービス」と3階層でモデル化している。プログラム群やデータ群のモデルを共通化することによって、ECHONET Lite 規格に基づく通信（ECHONET Lite 通信）により実際に機器が操作できる⁽⁸⁾。現在、様々な機器に対応した機器オブジェクトが120以上定義されている。この中にはセンサ類、エアコン、照明などの省エネ機器、蓄電池、ヒートポンプ給湯機などのエネルギーを蓄える蓄エネ機器、太陽光発電、燃料電池などのエネルギーを作り出す創エネ機器、各種スマートメーターなどの計測機器、業務用パッケージエアコン、ショーケースなどの業務用機器が含まれている。

3 ECHONET Lite Web API

家庭には、家電、住宅設備、健康関連機器、そして電気自動車など幅広い機器が存在する。またサイバー空間上にはエネルギーマネジメントをはじめ、快適生活支援、ヘルスケアやセキュリティなどのサービスが存在する。ECHONET Lite Web API は、各種のサービスが家庭内の機器を活用して効率的にアプリケーションを実現していくために、エコーネットコンソーシアムが定めたものである⁽⁵⁾。

ECHONET Lite Web API 利用のイメージを図5に示す⁽⁹⁾。ECHONET Lite Web API は、家庭内の機器が接続されたサイバー空間上のサーバと、同じくサイバー空間にあるエネルギー、ヘルスケア、防災などの様々なサービス（クライアント）との間をつなぐ役割を担う。多数あるサーバもクライアントも、共通でECHONET Lite Web API を用いることで、相互接続性を高めることができ、開発の手間を削減することができる。クライアント側とサーバ側が安心してECHONET Lite Web API を利用できるよう、エコーネットコンソーシアムはサイバー空間における「秩序ある協創空間」を掲げ、クラウド上で接続する事業者が信頼できる

図5 ECHONET Lite Web API 利用のイメージ⁽⁹⁾

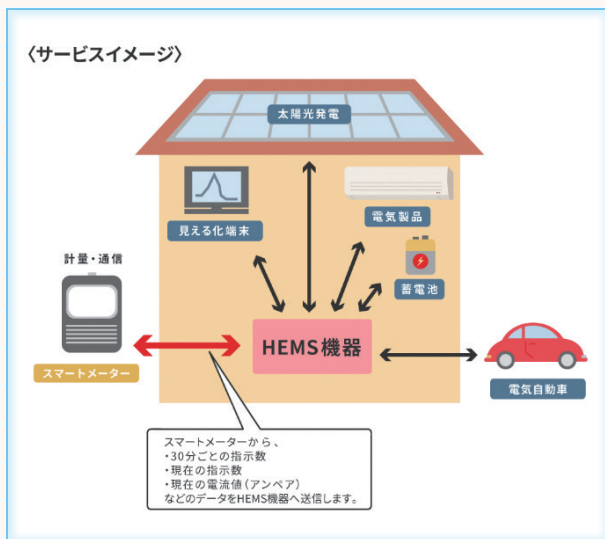


図6 スマートメータと HEMS 機器の接続 ⁽¹¹⁾

ことの証明や、相互接続が円滑に実現できるインタフェースの定義を目指している。

ECHONET Lite と同様に、ECHONET Lite Web API 上では機器がモデル化されており、クライアントはサーバ側に実装された ECHONET Lite Web API に設けられたモデルにアクセスすることで、機器の情報を得たり、機器に命令を送ることができる。

4 スマートメータと ECHONET Lite

スマートメータは、2014 年から各家庭へ順次導入が進んだ電力量計で、毎月の検針業務の自動化や HEMS コントローラ等を通じた電気使用状況の「見える化」を可能にする ⁽¹⁰⁾。図6に示すように、スマートメータを HEMS コントローラと接続する際に、ECHONET Lite が用いられる ⁽¹¹⁾。スマートメータの様々な測定結果を ECHONET Lite 通信によって HEMS コントローラ等へ伝えることで、住人は電力の使用量などを把握することができる。

更に、機能が向上した次世代スマートメータが2025 年から順次導入される予定である。図7に示すように、次世代スマートメータは、停電の早期解消や計画停電の回避のような電力レジリエンスの強化、再エネ大量導入・脱炭素化が進んだ際の系統全体の需給安定化、そして効率化・需要家の利益向上などを目指して開発された ⁽¹²⁾。これらの実現のため、停電検知・復旧検知機能、従来の 920 MHz 帯の Wi-SUN 通信機能に加え、Wi-Fi 機能の搭載、そして電力スマートメータを介してガス・水道などのメータの検針データを収集する共同検針が可能となっている。

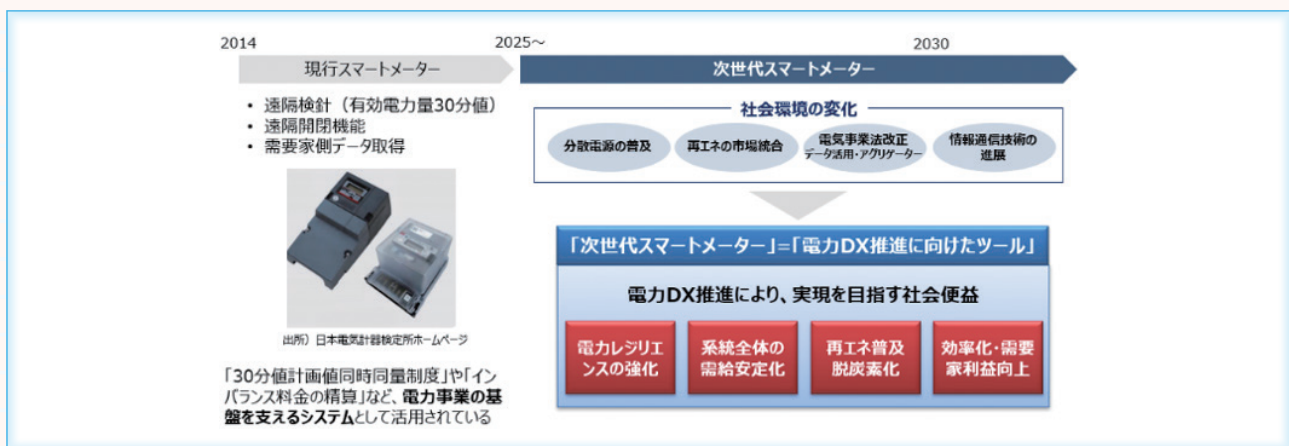


図7 次世代スマートメータの特徴 ⁽¹²⁾

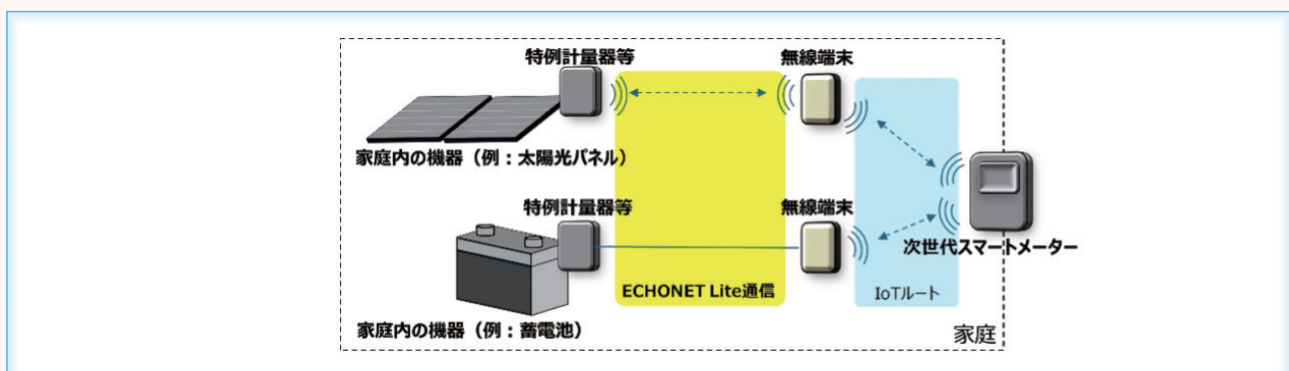


図8 特例計量器と IoT ルート ⁽¹³⁾

表 1 分散電源電力量メータクラスで取得可能な値の例⁽¹⁴⁾

特例計量器に入力される電力・電力量	
現在値	瞬時電力計測値（交流入力）
	積算電力量計測値（交流入力）
履歴値	積算電力量計測値履歴（交流入力）
定時	定時積算電力量計測値（交流入力）
特例計量器から出力される電力・電力量	
現在値	積算電力量計測値（交流出力・自立出力）
	瞬時電力計測値（交流出力・自立出力）
履歴値	積算電力量計測値履歴（交流出力・自立出力）
定時	定時積算電力量計測値（交流出力・自立出力）

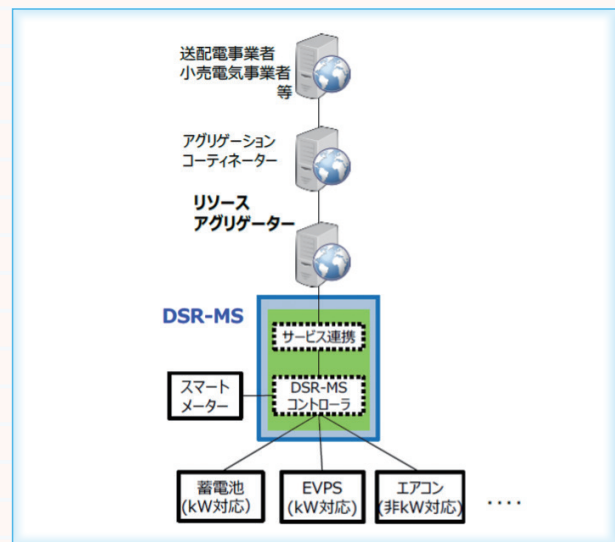
特筆すべき点として、太陽光パネルや蓄電池などの家庭内の機器等に設置された「特例計量器」と呼ばれるメーターと次世代スマートメータは、図8に示すように無線端末を介して接続できる点が挙げられる⁽¹³⁾。スマートメーターと無線端末との間を「IoT ルート」と呼ぶ。また、無線端末と特例計量器の間の通信方式にはECHONET Lite が用いられる。エコーネットコンソーシアムでは、特例計量器等に用いるための「分散型電源電力量メータクラス」と名付けた機器オブジェクトの詳細規定を策定した⁽¹⁴⁾。

分散型電源電力量メータクラスを簡単に紹介する。分散型電源電力量メータクラスを用いることで、特例計量器に接続された無線端末等の機器は、特例計量器から表1に示すような値を得ることができる。特例計量器に電力が入力される方向（例えば、蓄電池なら充電する方向）については、瞬時電力に加え、一定期間の積算電力量やその履歴を取得することができる。また、毎時決まった時間に記録した積算電力量を後から得ることもできる。電力が出力される方向（蓄電池なら放電となる方向）についても同様に、瞬時電力、積算電力量、及びその履歴と、定時の積算電力量を得ることができる。オプションで自立出力についても値を得ることができる。これらを用いることで、蓄電池が蓄えた電力量や太陽光発電の発電量を知ることができるため、正確で効率的なDRなどに役立つ。

5

ECHONET Lite Web API
の更なる活用

上述したECHONET Lite やECHONET Lite Web APIの活用が、今後、更に期待される場として、VPPや家庭内の機器をDRに対応させるためのDRready化が挙げられる。

図9 VPPのシステム構成の例⁽¹⁶⁾

5.1 VPPにおける活用

VPPとは、電力系統に接続されている発電設備や蓄電設備を制御し、必要に応じて電力を設備・機器側から系統側へと逆方向に供給する逆潮流を行うなどして、発電所と同等の機能を提供する概念である⁽¹⁵⁾。このVPPの中でも昨今、家庭にある太陽光パネルや蓄電池・EVなどのDERを制御して、活用する方法が注目を集めている。

DERが家庭の外側の通信ネットワークと接続する手段として、RAがHEMSコントローラ等を介してDERを制御するための「VPPにおける需要家エネルギーリソースの活用に関するガイドライン」（以下、「VPPガイドライン」）を、一般社団法人日本電気工業会（JEMA: Japan Electrical Manufacturers' Association）が提供している⁽¹⁶⁾。このガイドラインの中ではHEMSコントローラ等を「DSR-MS (Demand Side Resources - energy Management System)」と呼んでおり、RAとDSR-MS等との間で通信するデータの内容や手順などが記されている。このガイドラインの中に、ECHONET Lite Web APIの活用事例が記載されている。

VPPガイドライン中に記載された家庭の機器を使ったVPPのシステム構成の一例を図9に示す。電力の供給状況に合わせて、家庭内の機器の消費電力量を調整することなどを実現するために、送配電事業者や小売電気事業者等の求めに応じ、アグリゲーションコーディネータ（AC）やRAが家庭等の機器の制御方法を決める。そしてDSR-MSを経由して、RAが機器を制御する。

JEMAはVPPガイドラインの作成のために、VPP実証の関係者、RAや機器メーカーなどに対してヒアリングを行った。ヒアリング結果に基づき、VPPガイドラインには、事業者やメーカーが異なるRA、DSR-MS、及び家庭内機器が円滑に問題なく接続されるための実装方法

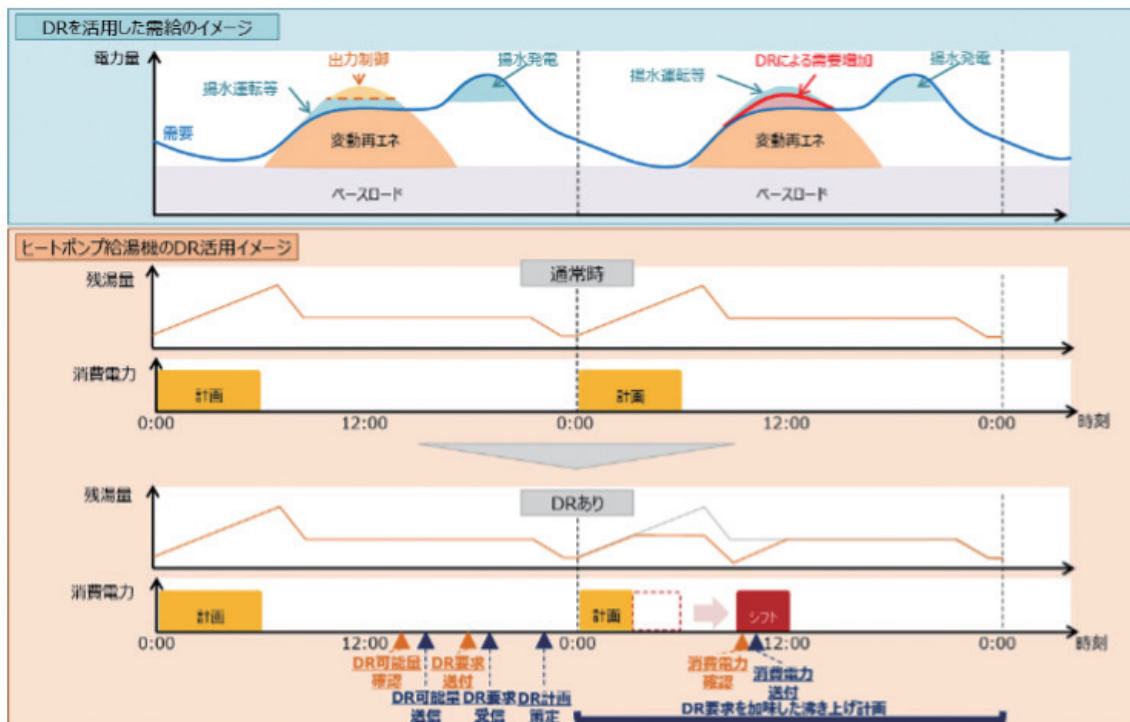


図10 ヒートポンプ給湯機を用いたDR⁽¹⁸⁾

が記されている。特に、RAとDSR-MSの間での家庭側の機器の把握のためのやり取り、機器を制御するために必要な情報や制御指示の授受方法などについて定めている。RAが家庭内の機器の一つ一つを制御したい場合もあれば、まとめて包括的に制御したい場合もあるため、いずれにも対応できることを求めている。

VPPガイドラインには、RAがDSR-MSから情報を入手し、機器制御の指示を出し、その状況や結果を受け取り、制御を終了するまでの各処理において、ECHONET Lite Web APIを利用した実装の例が記されている。エコーネットコンソーシアムではこの記載を参照し、DR関連サービス仕様⁽¹⁷⁾を作成した。RAがVPPに対応する場合や、メーカーがDSR-MSを開発する場合の設計のよりどころとなる。

5.2 DRreadyにおける活用

DRreadyに関して2024年6月から資源エネルギー庁が勉強会を実施しており、資料と議事要旨が公開されている。勉強会ではまず、ヒートポンプ給湯機のDRready化について議論された。従来は夜間の安価な電力を用いて湯沸かしをしていたが、これを太陽光発電量がピークとなる昼間の時間帯にシフトさせることを検討している。更に、現在は蓄電池の充放電制御について検討しており、今後はEV充電器／EV充放電器について検討を進める予定となっている。これら機器がDRready化された折には、サイバー空間から家庭内の

DRready機器を制御するために、ECHONET Lite Web APIを活用できる可能性がある。

ヒートポンプ給湯機において、お湯を沸き上げる時間を夜間から昼間にシフトさせるイメージを図10に示す⁽¹⁸⁾。従来のヒートポンプ給湯機は、電気料金が安価な夜間に沸き上げる動作が主だった。しかし、変動再エネに分類される太陽光発電による発電量が昼間にピークを迎えることから、その電力を無駄なく有効に活用するため、図10上段に示すように、DR指示により昼間に沸き上げをシフトして需要を増加させることを検討している。図10下段に示すとおり、沸き上げ時刻の変更により、夜間早朝の残湯量は減少することになるが、昼間の沸き上げにより回復できる。機器は残湯量の減少を考慮し、一部のみ昼間に移すなどの対応をすることで、湯切れを回避することができる。この実現のため、機器はシフトにより昼間にどれくらいの電力を消費できるかを試算し（DR可能量確認）、この値をクライアントへ送信する（DR可能量送信）。このデータに基づきクライアントは各給湯機の沸き上げ時間を決め、機器に指示を出す。（DR要求送付、受信、DR計画策定。）

これを実現するため、DRready勉強会ではヒートポンプ給湯機側に求められる機能として以下を定めている⁽¹⁹⁾。

- ① DR可能量を送信できる
- ② DR要求による沸き上げ開始時刻を受信できる
- ③ DR要求による沸き上げ開始時刻を加味した沸き

上げ計画を策定できる

- ④ 現在の消費電力の推定値または計量値を送信できる
- ⑤ 個体を識別して制御することが可能な情報を保有、確認できる

これらの機能を備える数多くのヒートポンプ給湯機と、それを制御するクライアントとの間で、円滑にデータを伝送し指示を出す仕組みが必要となる。ECHONET Lite Web API は、これらの大量の機器に対して効率的に指示を出すために、バルク処理機能、グルーピング機能や履歴データ機能を用意している⁽⁵⁾。バルク処理機能では、クライアントが任意の機器に命令を送信する際に、複数の命令を列挙した命令セット (bulk) を用いる。一括で複数の機器に対する複数命令を送信することで、効率的に指示を出すことが可能となる。

またグルーピング機能では、複数の機器をまとめてグループ化し、共通の命令などを実行することができる。各家庭にあるヒートポンプ給湯機や蓄電池の一つ一つに個別に命令を出すのは大変だが、ECHONET Lite Web API を用いれば、グルーピング機能を用いて機器をまとめて、1回の命令でグループに対して指示を出すことができる。

更に履歴データ機能は、クライアントが機器のデータを過去に遡って取得することができる。機器のデータをサーバが蓄積しておき、クライアントからの求めに応じて提供する。例えば、電力使用量などをアプリ上でグラフ表示するためなどに活用できる。

6 まとめ

第7次エネルギー基本計画において、カーボンニュートラルの動きが一段と注目される中、家庭内やサイバースペースからの機器の制御を実現すべく、エコーネットコンソーシアムはECHONET LiteやECHONET Lite Web APIを定めてきた。将来のエネルギーシステムの重要な一角を担う次世代スマートメータや特例計量器、そして家庭内の機器を用いたDRやVPPなどで、これらの規格の活用が期待される。これらが本格的に普及するに当たり、引き続きエコーネットコンソーシアムは社会に資する規格の策定や活用の支援を継続したい。

■ 文献

- (1) 資源エネルギー庁, “エネルギー基本計画,” Feb. 2025.
- (2) 資源エネルギー庁, “Zero Energy Houseに関する情報公開について.” https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/general/housing/index03.html

- (3) 資源エネルギー庁, “DRready 勉強会.” https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/dr_ready/index.html
- (4) エコーネットコンソーシアム, “ECHONET Lite 規格の概要.” <https://echonet.jp/about/features/>
- (5) エコーネットコンソーシアム, “ECHONET Lite Web API ガイドライン,” Ver.1.2.0, March 2025.
- (6) エコーネットコンソーシアム. <https://echonet.jp/>
- (7) 経済産業省, “J S C A国際標準化WG スマートハウス標準化検討会とりまとめの公表.” Feb. 2012.
- (8) エコーネットコンソーシアム, “APPENDIX ECHONET 機器オブジェクト詳細規定,” Rel. R, Rev.3. March 2025.
- (9) エコーネットコンソーシアム, “ECHONET 2.0.” https://echonet.jp/echonet_20/
- (10) 東京電力パワーグリッド, “電力メーターとは.” <https://www.tepco.co.jp/pg/consignment/for-general/basic-knowledge/smart-mater.html>
- (11) 東京電力パワーグリッド, “電力メーター情報発信サービス (B ルート サービス).” <https://www.tepco.co.jp/pg/consignment/liberalization/smartmeter-broute.html>
- (12) 次世代スマートメーター制度検討会, “次世代スマートメーター制度検討会取りまとめ.” May 2025.
- (13) 資源エネルギー庁, “特定計量 (IoT ルート) 運用ガイドライン,” 第 1.0 版. June 2024.
- (14) エコーネットコンソーシアム, “分散型電源電力量メータ・HEMS コントローラ間 アプリケーション通信 インタフェース仕様書,” Ver.1.00, Nov. 2022.
- (15) 資源エネルギー庁, “VPP・DR とは.” https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/vpp_dr/about.html
- (16) JEMA, “VPP における需要家エネルギーリソースの活用に関するガイドライン.” June 2023.
- (17) エコーネットコンソーシアム, “ECHONET Lite Web API ガイドライン DR 関連サービス仕様,” Version 1.0.0, June 2023.
- (18) 資源エネルギー庁, “ヒートポンプ給湯機の DRready 要件 (案),” 第 2 回 DRready 勉強会, 資料 3, July 2024.
- (19) 資源エネルギー庁, “ヒートポンプ給湯機の DRready 要件 (案),” 第 4 回 DRready 勉強会, 資料 4, Jan. 2025.

佐方 連 (正員)

(株) 東芝 エコーネットコンソーシアム企画運営委員長. 1999 京大・工・電気電子卒. 2001 同大学院修士課程了. 2001 (株) 東芝入社. 無線通信装置の信号処理や通信プロトコルの研究開発に従事. 2006 本会学術奨励賞, 2022 本会通信ソサイエティ活動功労賞各受賞. 京大博士 (情報学), 第一級陸上無線技術士, 気象予報士. 2016 弁理士試験合格.



サステナブルな ICT インフラの実現に向けて

林 俊宏 Toshihiro Hayashi NTT

1 はじめに

近年、生成 AI の急速な発展とともに、計算資源への需要が飛躍的に増加しており、それに伴うデータセンター（DC）の建設、稼動が世界各地で加速している。特に、高度な AI モデルの運用には莫大な電力を必要とし、消費電力の増加が新たな問題として浮上している。日本においても、デジタル技術を活用しビジネスを変革する DX（Digital Transformation）と、再生可能エネルギー（再エネ）への転換により社会を変革する GX（Green Transformation）の両立が求められている。こうした背景から、膨大な計算資源を支える通信インフラと電力インフラの連携がこれまで以上に重要視されている。

本稿では、2. で生成 AI の普及拡大に伴う DC 需要の増加について、続く 3. で DC の電力需要増への対応や脱炭素化に向けた課題についてそれぞれ述べた後、4. では次世代の ICT とエネルギーの効果的な連携を図る概念として注目される「ワット・ビット連携」について解説する。5. では関連する取組み事例を紹介し、最後に 6. ではワット・ビット連携の将来像の実現に向けた課題について論じる。

2 生成 AI の普及拡大に伴う DC 需要の増加

生成 AI では、プロンプトを AI に送ることで文章や画像などが生成される。これらの生成物は AI が過去に学習したデータから生み出されたものであり、その精度を高める上で、AI はより多くのデータを学習する必要がある。多くの生成 AI では、演算処理を高速で行う高性能の GPU（Graphics Processing Unit）サーバを使って学習している。それに伴い大容量のサーバを大量に設置するための DC を確保する必要がある、必然的に

消費電力も高くなる。

生成 AI は実際にどのくらいの消費電力を発生させるのだろうか。米国のスタンフォード大の 2023 年の報告⁽¹⁾によると、AI のモデルの消費電力量はパラメータ数や DC のエネルギー効率などの要因に左右されるが、ChatGPT を生み出した OpenAI 社の言語モデル「GPT-3」の場合、機械学習の際の消費電力量が 1,287 MWh となる試算を出している。これは、原子力発電 1 基の 1 時間分の電力量（約 1,000 MWh）を上回る規模である。

図 1 に日本の電力需要量の年度推移を示す。日本では 2023 年度までは人口減少や節電・省エネルギーなどにより電力需要が減少傾向にあったが、今後、DX や GX の進展により、電力需要が増加に転じることが見込まれている。その要因の一つとして想定されているのが、前述した生成 AI の利用拡大に伴う DC 需要の増加である。2024 年度の国内の電力需要は約 8,000 億 kWh であるが、生成 AI の利用拡大に伴う DC や半導体工場の新増設等により、2034 年度で 465 億 kWh の消費電力量の増加（2024 年度比で約 6 % 増）を見込む想定が示されている⁽²⁾。また、研究機関の試算によれば、2050 年には DC による消費電力量は、現在と比較して 1,000 億 kWh 弱、最大で 2,000 億 kWh まで増加すると想定されている⁽³⁾。言い換えると、将来の DC の電力需要は国全体の 10～20 % を占めることになり、これは関西エリアや中部エリアの電力需要に匹敵する規模である。最先端技術の導入による DC の省エネ化や効率改善は今後進むと思われるが、将来の DC 需要の増加が日本の電力市場に与える影響は非常に大きいと言える。

3 DC の電力需要増への対応や脱炭素化に向けた課題

DX や GX の進展による電力需要の増加が見込まれる

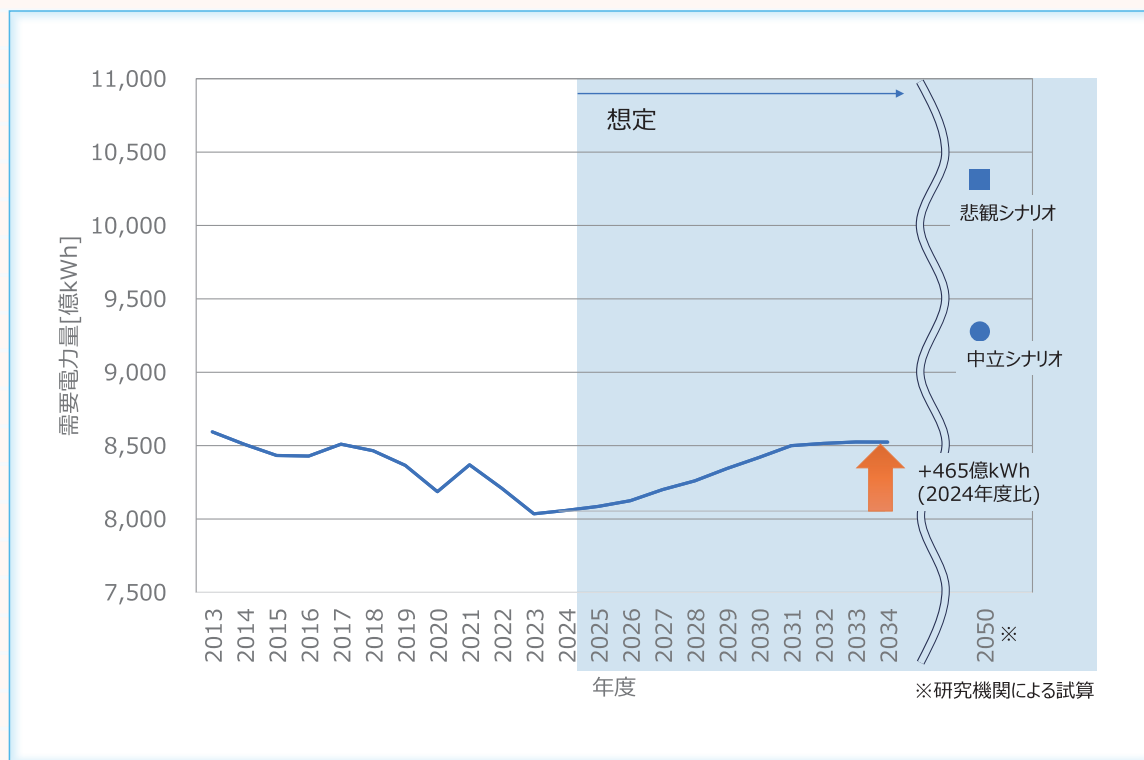


図1 日本の需要電力量の想定

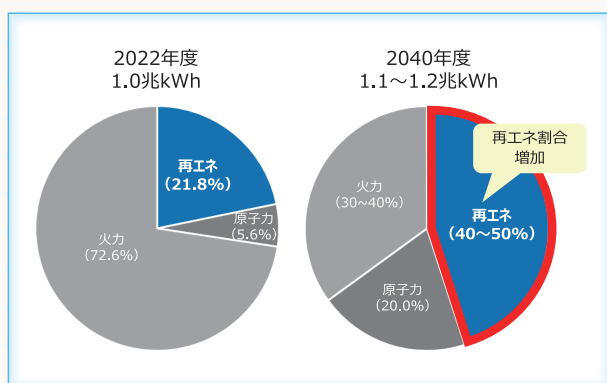


図2 日本の電源構成比率の見通し

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20250218_02.pdf を元に作成

中、それに見合った脱炭素電源を安定的に十分確保できるかが、産業競争力を左右する状況にある。このような状況下で、日本政府は第7次エネルギー基本計画（2025年2月閣議決定）⁽⁴⁾において、再エネを主力電源として最大限導入する方針を打ち出している。図2のように、再エネの電源構成比率を2022年度の21.8%から、2040年度に40~50%まで増加させる見通しを示している。

以下、DCにおける再エネの活用を進めるに当たっての課題を挙げていく。

3.1 DC需要との地理的なミスマッチ

まず問題となるのが、DCの立地と再エネの導入ポテ

ンシャルとの間に存在する「地理的なミスマッチ」である。DCは、ユーザとの通信におけるレイテンシや、交通アクセス、インフラの利便性、更に東京や大阪を中心とした大都市圏のビジネスニーズに対応する必要性などから、国内では約6割が関東（主に東京、千葉、神奈川）、約2割が関西（主に大阪）に集中して設置されているという現状がある⁽⁵⁾。一方で、再エネの導入ポテンシャルが高いのは、広大な土地や自然資源に恵まれた北海道、東北、中国、九州などのエリアである⁽⁶⁾。こうした再エネポテンシャルの高い地域と、DCの需要が集中する地域の間には地理的ミスマッチが存在し、DCの脱炭素化を実現する上で大きな障壁となっている。

その対策としては、再エネが豊富な地域で発電された電力を、需要のある都市部に送電するための電力システムの増強などが挙げられる。しかし、現行の電力インフラには課題も多い。例えば、電力会社ごとの各エリア間をつなぐ地域間連系線の容量に限界があるため、エリア間で電力を融通するためには送電能力を増強する必要がある。それには多額の投資と長い期間を要する。また、送電ロスの問題や送電コストの上昇といった技術的、経済的なハードルも無視できない。

3.2 DC需要との時間的なミスマッチ

再エネの中でも、太陽光発電や風力発電は自然条件に大きく依存し、その発電量は気象条件や時間帯によって

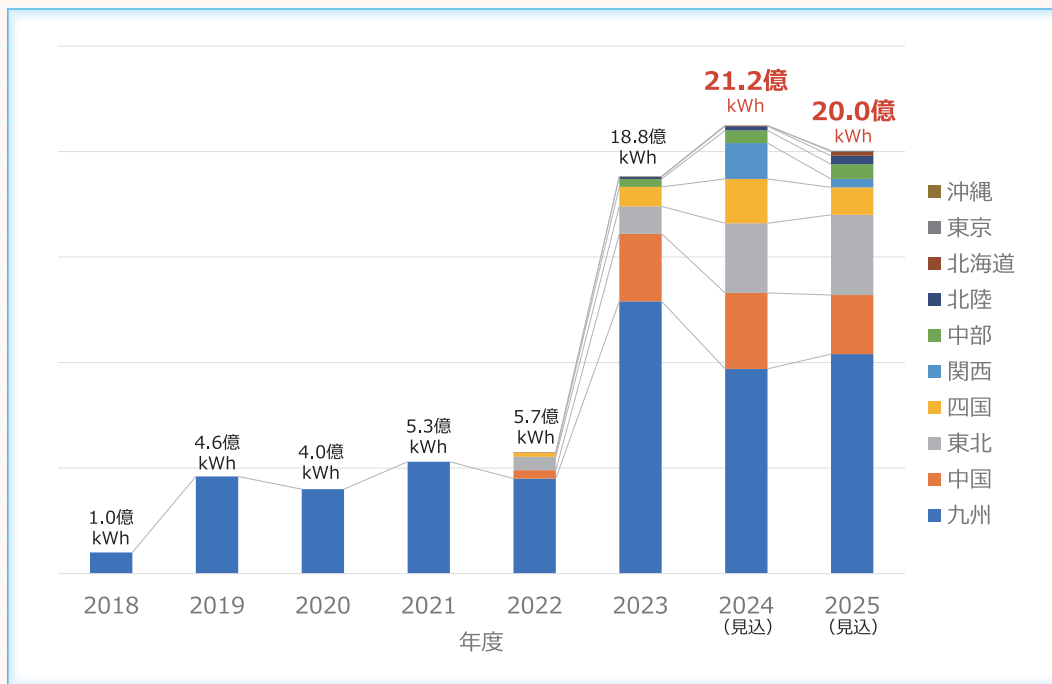


図3 日本における再エネの出力制御量の推移

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/ を元に作成

変動する。一方で、DC は「24 時間・365 日」の安定稼働が求められており、一定の電力供給を継続する必要がある。そのため、再エネ電源で DC を安定稼働させるには、再エネの発電量の変動によって生じる時間的なミスマッチも解消する必要がある。

その対策として、蓄電池や揚水発電などを活用した電力貯蔵が挙げられる。しかし、DC の電力需要が増大する中、電力供給の安定性を確保するためには十分な設備容量が必要となり、その設備投資は膨大なコストを伴うと考えられる。

加えて、こうした変動性・不安定性のある再エネの導入が拡大するほど、電力系統における発電と需要のバランスの調整、いわゆる需給調整が難しくなる。電気の発電量がエリアの需要量を上回る場合、火力発電の出力の抑制や地域間連系線の活用等による調整が図られる。それでもなお余剰電力が発生する恐れがある場合には再エネ電源の出力制御が行われる。図3に日本における再エネの出力制御量の推移を示す。再エネの導入が先行して進んでいた九州電力では2018年度から、ほかのエリアでも2022年度以降に、太陽光発電や風力発電に対する出力制御が実施されており、2024年度の出力制御は21.2億kWh（前年度比の約1.1倍）、2025年度も20億kWhを超えると見込まれている⁽⁷⁾。出力制御は電力系統における需給バランスを安定させるための必要な措置ではあるものの、余剰電力が活用されず失われることを意味しており、再エネの主電源化に向けた更なる有効活用が課題であるとも言える。

4

ワット・ビット連携の概念とその意義

このように DC の脱炭素化に向けて、DC 需要と再エネの地理的及び時間的なミスマッチの解消などの課題がある中で、「ワット・ビット連携」の概念が注目されている。これは2025年2月に示された「GX2040ビジョン」で提唱され、「効率的な電力・通信インフラの整備を通じた電力と通信の効果的な連携」と定義している⁽⁸⁾。

ワット・ビット連携のイメージを図4に示すが、図4(a)のように、次世代の通信インフラである APN (All-Photonics Network) を活用した DC の分散配置が期待されている。APN はネットワークから端末まで、全てにフォトニクス（光）ベースの技術を導入し、エンド・ツー・エンドでの光波長パスを提供する波長ネットワークにより、圧倒的な低消費電力、高品質・大容量、低遅延の伝送を実現するもので、2024年3月から APN 専用線サービスの提供も開始された⁽⁹⁾。この APN の特性を生かし、DC 間を APN で接続することで、DC の立地制約（レイテンシに由来する需要地からの距離の制限）を緩和することができる。また、通信インフラの整備は一般的に電力インフラに比べてコスト負担が少なく、施工期間も短いことから、増大する直近の DC 需要への迅速な対応が可能となる。そのため、まずは電力供給に適したエリアへの DC 誘致を進め、必要となる通信インフラも計画的に整備する方針が示されている。この

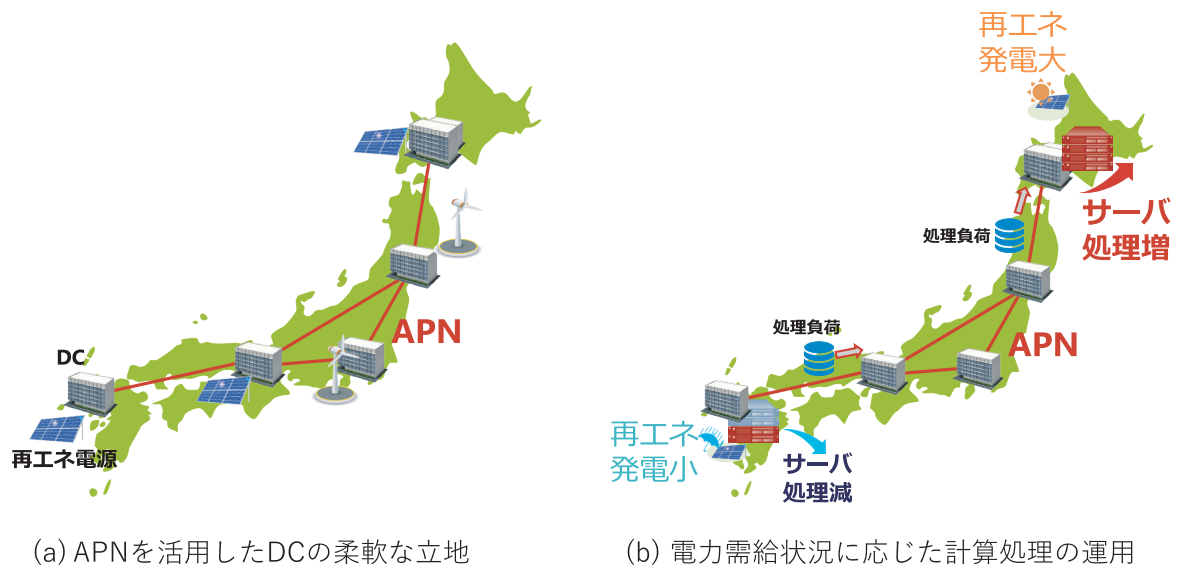


図4 ワット・ビット連携のイメージ

ような地方分散型の DC 整備は、関東圏・関西圏への過度な集中によるリスクの低減に寄与するだけでなく、地方創生の観点からも意義のある取組みであると位置付けられている。

また、このようなインフラ整備に加えて、複数の DC 間で計算処理（ワークロード）を最適に運用することで、電力の需給調整を図ることも期待されている。近年の仮想化基盤や分散クラウドの発展に伴い、地理的に離れた複数の DC を一つの統合された DC のように運用し、拠点間の通信経路を柔軟に設定できる環境が整いつつある。この技術を活用することで、図 4 (b) のよう

に再エネの発電状況や電力系統の混雑状況などに応じて、DC で稼動するワークロードを異なるエリアの DC へ高速に移動させることが可能となる。つまり、「ビットを動かすことでワットを調整する」制御が実現し、再エネの有効活用を最大化するとともに、DC のカーボンニュートラルに貢献することが期待される。

ワークロードの移動については、許容される遅延時間を考慮した上で、ターゲットとなるサービスやアプリを検討する必要がある。以下、生成 AI での計算処理を例に説明する。生成 AI におけるプロセスごとの計算処理の特徴を表 1 にまとめる。

表 1 生成 AI の学習・推論の計算処理の特徴

項目	学習 (Training)	推論 (Inference)
計算ハードウェア	ハイエンド GPU/TPU	多様 (GPU/CPU/ASIC/FPGA/NPU)
負荷パターン	長時間連続でフル負荷	短時間バースト / 平均負荷は低い
処理時間スケール	数時間～数週間 / 周期的	短時間 / 継続的
メモリ (VRAM) ニーズ	大容量	モデルサイズ依存
入出力データ量	大規模データセット	個別 / バッチ入力
データフロー	バッチ / オフライン	リアルタイム / ストリーミング
ネットワークレイテンシ	感度低い	感度高い (リアルタイム)
ストレージ容量	大容量	小容量
モデルと計算ハードウェアとの物理的距離	近距離が理想	DC 間相互接続を用いて遠隔配置可能 ※初回モデルロード後はローカルキャッシュで処理
消費電力	大きい	個別は小さい / 効率重視 総消費電力は今後増大 (利用者数・デバイス数に依存)
処理拠点の規模	大規模データセンターが中心	エッジ / デバイスにシフト

生成 AI の開発には、まず巨大なデータセットを使ってモデルを「学習」させるプロセスがある。この「学習」は、高性能な GPU などを用いた数週間に及ぶ長期間の計算処理を伴う。大量の電力を消費する一方で、リアルタイム性は求められておらず、計算処理の中断と再開が可能であることから、実行場所やタイミングを調整できるという特徴がある。この特徴を生かして、再エネ電力が余剰となっているエリアや、DC の稼働率が低いタイミングで計算処理を実行させることで、電力需要の柔軟な調整が可能となる。

続けて、学習済みの AI モデルが実際に動作する「推論」のプロセスでは、入力に応じてリアルタイムで出力を生成する。この「推論」は、1 回当りの計算量や消費電力は少ないものの、リクエスト数が利用者数やデバイス数によるため、今後、生成 AI の活用が拡大するにつれて、総消費電力は多くなることが予想される。また、自動運転のような低遅延が求められるようなユースケースも将来想定されるため、タイミングをずらして計算処理をすることは難しく、可能な限り需要地の近くで計算処理させることが望ましい。その観点から、地方分散型 DC の整備は理にかなっていると言えるであろう。

5 分散 DC 間の協調制御に関する国内外の事例

前章において述べたワット・ビット連携の概念は、DC の柔軟な立地と、最適な運用による再エネの最大活用を通じて、脱炭素社会の実現に資する新たなアプローチである。現状では、データ需要の二極（東京・大阪）集中傾向による地方 DC の需要確保の難しさ、オペレーション上の手間やレイテンシなどの運用上の問題点、ネットワーク環境整備の遅れや地域住民との対話など、受入れ側の障壁などの観点から、DC の地方分散の動きは限定的ではある⁽¹⁰⁾。一方で、将来の DC 地方分散化を見据え、分散 DC 間の協調制御に関する技術実証が行われている。

以下、国内外の事例を幾つか紹介する。

5.1 NTT コミュニケーションズ*の「GPU over APN」^{(11), (12)}

GPU over APN とは、次世代ネットワーク基盤である IOWN APN で DC 間を接続し、複数拠点間で GPU クラスタを構成するコンセプトである。APN の持つ超低遅延・広帯域という特徴を生かし、物理的に離れた拠

点にある GPU 資源を、あたかも一体の仮想基盤として利用することができる。これにより、一つの DC の床面積や電力供給能力に制限されることなく、計算処理量の変動に応じた GPU リソースをオンデマンドに確保できるようになる。また、利用者の拠点から移動できない機密度の高いデータの取扱いも可能となる。

同社では、三鷹・秋葉原・川崎の 3 拠点の DC 間を APN で接続し、NVIDIA H100 GPU サーバを分散配置した分散 DC 環境を世界で初めて構築した。この実証では分散 DC 環境上で NTT 版大規模言語モデル「tsuzumi」のモデル学習を実施させた結果、単一の DC とほぼ同等の処理時間で学習を完了することが確認された。

同社では、今後、日本全国での分散 DC の配置を見越した、拠点数の増加と距離延伸の実証や、分散 DC における通信方法や GPU リソースの最適化検証を進める予定である。また、法人向けのサービス提供を視野に入れ、AI 社会に必要な大規模・高性能な計算基盤としての展開を進めていく方針である。

5.2 東京電力パワーグリッドと日立による系統連携型エネルギーマネジメント⁽¹³⁾

両社は、今後増加が見込まれる DC を電力の調整力として活用するため、東京都内 2 か所及び神奈川県内の計 3 か所の DC 間で、電力系統連携型エネルギーマネジメントに関する実証実験を実施している。実証では、DC 間で最適にワークロードをシフトすることで各エリアの再エネを有効活用するとともに、大容量ネットワーク並びに蓄電池などを活用することで調整力創出の高速化に成功し、電力需給バランスにおける周波数調整への活用可能性を確認している。また、生成 AI アプリケーションを対象としたワークロード移動も、ダウンタイムはほぼなしで可能であることを実証している。

DC のエネルギーマネジメントによる電力需要調整は、需給調整市場（送配電事業者が電力の需要と供給のバランスを取るために必要な調整力を調達する電力取引市場）における調整力として期待される。両社は将来的な需給調整市場への投入に向けて引き続き実証を重ね、事業化を進めていく方針である。

5.3 アジャイルエナジー X^{(14)~(16)}

再エネの余剰電力と先端半導体技術を組み合わせた、未来型の分散型 DC を日本各地に展開していく事業を展開している。需要以上に発電してしまった再エネの余剰電力の抑制や、電力系統の混雑回避のため、DC などに新しい需要を生み出すことで、再エネの余剰電力を「地産地消」で有効活用していくことを狙いとしている。

2023 年には、太陽光発電追従型のコンテナ型 DC に

* 2025 年 7 月 1 日から「NTT ドコモビジネス」に社名変更。

よる再エネの有効活用に関する実証を開始している。これは、太陽光発電の発電量を追従しながら、分散コンピューティングの一種であるビットコイン・マイニングの処理を自動制御することで、コンテナ型 DC で再エネ電力を自家消費し、再エネの出力制御回避に貢献するものである。また、2024 年には再エネとビットコイン・マイニング、及びマイニング装置からの排熱利用を組み合わせた「究極の循環経済」モデルに関する実証を開始しており、再エネの有効活用だけでなく、新たな付加価値の創出に向けた取組みを進めている。

5.4 Google の「Carbon-Aware Load Shifting」⁽¹⁷⁾

海外の分散 DC の協調制御の事例として、Google の Carbon-Aware Load Shifting を紹介する。グローバルに分散された DC 群において、電力系統の炭素強度に応じて、計算処理の実行タイミングを調整する取組みである。再エネを DC で効率良く利用するためのシステム「carbon-intelligent computing platform」において、翌日の炭素排出予測に基づく電力利用の最適化を行っている。具体的には、バッチ処理型の柔軟なワークロード（データ圧縮、機械学習、シミュレーション、ビデオ処理など）を対象に、再エネ比率の高い時間帯や地域にシフトさせることで、炭素排出量の削減を図っている。

同社は、事業を展開する全ての電力系統で「24 時間 365 日」カーボンフリーエネルギー（CFE）を活用することで、2030 年までに排出ネットゼロを達成するという目標を掲げており、この取組みは目標達成に貢献するものであると言える。

6 将来像実現に向けての課題

前章で紹介した事例を踏まえて、ワット・ビット連携の将来像を実現するためには、まずは DC の地方分散を後押ししていくことが重要である。そのためには、DC 事業者が再エネ電源の活用を促すためのインセンティブ付与（新たな電力料金体系の構築、補助金の充実など）、DC 誘致や脱炭素の取組みに積極的な自治体との連携、地域特性に合わせた DC 設備とエネルギー設備の仕様検討などが必要となるであろう。

また、DC の受入れ側の理解を得ることも重要となる。自治体・住民・事業者が協力し、DC 設置が地域社会の課題解決・地域の活性化・産業振興・雇用創出等につながるような在り方を模索し、ステークホルダー間でビジョンを共有していくことが必要であると考えられる。

加えて、分散 DC 間の協調制御による電力需要調整を実現するためには、電力需給状況と連携した再エネと需

要のマッチングプラットフォームの構築や、プラットフォームと連動した余剰再エネの取引市場のような、新たな制度設計なども今後の検討課題となるであろう。

7 おわりに

ワット・ビット連携の構想は単なる電力効率やコスト効率の向上の観点にとどまらず、レイテンシ最適化、災害時や電力ひっ迫時におけるレジリエンスの強化、更には地域経済との共生といった多面的な価値を持つ。将来にわたって持続可能な ICT インフラを確立する上で、産官学の連携を通じて、構想が具現化していくことを期待したい。

■ 文献

- (1) Stanford University, “The 2023 AI index report.” <https://hai.stanford.edu/ai-index/2023-ai-index-report>
- (2) 経済産業省資源エネルギー庁, “今後の電力需要の見通しについて,” 2025 年 1 月 27 日. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/085_06_00.pdf
- (3) 電力広域的運営推進機関, “第 4 回将来の電力需給シナリオに関する検討会,” 2024 年 3 月 5 日. https://www.occto.or.jp/iinkai/shorai_jukyu/2023/2023_shorai_jukyu_4_haifu.html
- (4) 資源エネルギー庁, “エネルギー基本計画の概要 (2025 年 2 月閣議決定).” https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20250218_02.pdf
- (5) 総務省, “データセンター等のデジタルインフラ整備の現状と課題について,” 2024 年 10 月 3 日 GX 実現に向けた専門家 WG. https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/senmonka_wg/dai8/siryoushu.pdf
- (6) 東北大中田俊彦研究室, “地域エネルギー需給データベース (Version 2.10).” <https://energy-sustainability.jp>
- (7) 資源エネルギー庁, “再生可能エネルギーの出力制御に関する短期見通し等について,” 2025 年 1 月 23 日. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/smart_power_grid_wg/pdf/001_02_01.pdf
- (8) 内閣官房, “GX2040 ビジョン～脱炭素成長型経済構造・移行推進戦略 改訂～.” https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/pdf/gx2040_vision_kaitei.pdf
- (9) NTTコミュニケーションズ株式会社, “ニュースリリース (2024年2月29日).” <https://www.ntt.com/about-us/press-releases/news/article/2024/0229.html>
- (10) Green×Digital コンソーシアム, “データセンターの地方分散立地実現に向けた検討状況,” 2025 年 3 月 31 日. <https://www.gxdc.jp/pdf/regional-dc-report.pdf>
- (11) NTTコミュニケーションズ株式会社, “ニュースリリース (2024年10月7日).” <https://www.ntt.com/about-us/press-releases/news/article/2024/1007.html>

- (12) NTT コミュニケーションズ株式会社, “ニュースリリース (2025 年 3 月 19 日).” <https://www.ntt.com/about-us/press-releases/news/article/2025/0319.html>
- (13) 東京電力パワーグリッド株式会社, 株式会社日立製作所, “プレスリリース (2025 年 7 月 28 日).” <https://www.tepco.co.jp/pg/company/press-information/press/2025/pdf/250728j0101.pdf>
- (14) アジャイルエナジーX, “プレスリリース (2022年12月14日).” <https://agileenergyx.co.jp/2022/12/14/triple1-powergrid/>
- (15) アジャイルエナジー X, “プレスリリース (2023 年 12月6日).” <https://agileenergyx.co.jp/2023/12/06/poc-showamura/>
- (16) アジャイルエナジーX, “プレスリリース (2024年3月29日).” https://agileenergyx.co.jp/2024/03/29/demo_ult-cir-econ/
- (17) A. Radovanovic, R. Koningstein, I. Schneider, B.

Chen, A. Duarte, B. Roy, D. Xiao, M. Haridasan, P. Hung, N. Care, S. Talukdar, E. Mullen, K. Smith, M. E. Cottman, and W. Cirne, “Carbon-aware computing for datacenters,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 38, no.2, pp. 1270-1280, March 2023.

林 俊宏

NTT 宇宙環境エネルギー研究所.
2006 NTT 入社後, マイクログリッド
やデータセンターのエネルギーマネジ
メントに関する研究開発や国際標準
化, 米国での実証プロジェクト等を担
当. 現職では, データセンターやモバ
イルのカーボンニュートラルに向けた
エネルギー制御技術の研究等を担当.



無線電力伝送と通信の融合によるミリ波帯中継器

Millimeter-Wave Relay by Fusion of Wireless Power Transfer and Communication

白根篤史 Atsushi Shirane†

Summary

無線通信の高周波化が進み、5G（第5世代移動通信システム）では28 GHz帯、将来的には6Gで100 GHz超の利用も視野に入っている。キャリア周波数の高周波化により通信速度は向上するが、伝搬損の増大や強い直進性により基地局当りの通信カバレッジが狭くなるため、中継器の高密度な設置が不可欠となる。しかし、電源や光ファイバの制約から設置場所の確保が困難であること、加えて基地局における消費電力が大幅に増加してしまう。そこで、本稿では無線電力伝送（WPT）を用いた低消費電力かつ自由な場所に設置可能な中継器を提案する。WPT信号を活用して電力供給と周波数変換、ビームフォーミングを同時に行うことで、周波数シンセサイザやアクティブ回路が不要となり、中継器に必要な機能を飛躍的に低い消費電力で実現する。初期のプロトタイプであるCMOSプロセスを用いた24 GHz帯WPT型中継器、GaAsダイオードによる256素子大規模・大電力生成可能な中継器、また5.7 GHz帯の利用による長距離化やDバンドを利用した中継器の高速化について紹介し、今後の無線電力伝送型中継器の展開について論じる。

Key Words

Wireless Power Transfer, Wireless Communication, Integrated Circuits, Phased Array, 5G

1 はじめに

1.1 無線通信の高周波化

無線通信に利用するキャリア周波数は、通信速度の向上とともに高くなってきている。現在移行期にある4G LTEにおいては、sub6と呼ばれる6 GHz未満の周波数帯が利用されているが、5Gシステムにおいては、一桁高い周波数の28 GHz帯を利用したサービスが始まっている。移動体通信システムの発展を10年単位で考えると、現在は、次世代の6Gの開始を見込んでいる2030年に対して折り返し地点にきている。6Gにおいては、5Gで導入されたミリ波帯よりも更に高い周波数の利用も検討されており、100 GHzを超えるような周波数帯を利用して、更なる通信の高速化を目指している。

一般に、周波数を高くしていけば、通信速度は向上する一方で、通信カバレッジは狭くなってしまふ。5Gの28 GHz帯では、1チャンネルの帯域幅が400 MHzと、Sub6と比べて10倍以上広いため、帯域幅に応じた高速化が可能となる。更に、6Gにおいては、より高い周波数を利用することで、10

GHzを超える帯域幅の無線通信の実現が期待されている。しかし、周波数の向上に伴い、自由空間伝搬損が大きくなる。加えて電波の直進性が高くなり、見通し外での通信が困難になる。

ミリ波帯通信のカバレッジを広げるためには、きめ細やかな基地局の設置、そして無線中継器の配置が重要である。これまでのSub6周波数の基地局は、比較的低い伝搬損や電波の回込みによって、1台の基地局で数km以上の範囲をカバーすることができた。ミリ波帯では、最大でも数百mであり、より多くの基地局、無線中継器が必要となる。

1.2 ミリ波帯中継器の課題

ミリ波帯通信の普及に向けた大きな課題の一つが、基地局や中継器の設置場所である。従来の周波数帯に比べ、飛躍的に高い密度で設置していく必要があるため、新たに基地局や中継器を設置する場所を確保することが難しくなっている。基地局等を設置するためには、電源の確保や光ファイバの敷設が必要であり、設置できる場所は限られる。

もう一つの大きな課題が、高速化が進む無線通信ネットワークが消費する電力である。5Gにおいては、ミリ波帯を利用することで10 Gbit/sを超える通信速度を実現し、6Gにおいては更なる高速化が期待されている。我々が利用するデータ量は指数関数的に増大してきており、それを支えるモバイル通信のトラヒックも急激に増加している。データトラ

† 東京科学大学, 東京都
Institute of Science Tokyo, Tokyo, 152-8552
Japan

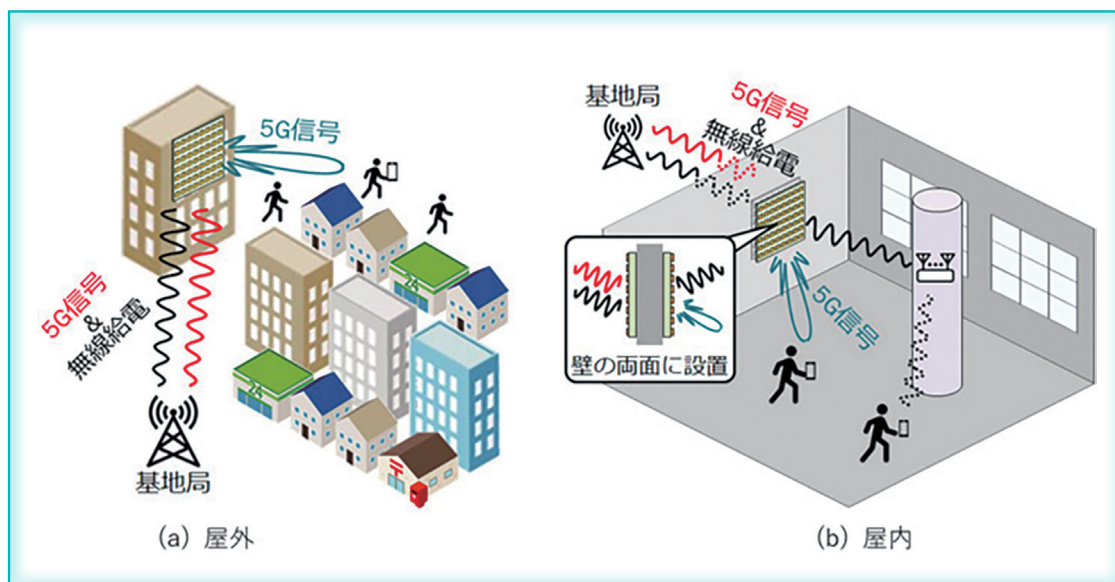


図1 提案する無線電力伝送型中継器のコンセプト

ヒックの増加は、通信インフラにおける信号処理のデータ量の増大や、通信方式の高度化につながり、基地局等の通信インフラにおいて消費される電力の増加をもたらす。このままトラヒックが増大していくと、2030年には年間2,000 TW・hを超える電力がネットワーク全体で消費されると予測されている⁽¹⁾。

持続的な無線通信の進化のためには、あらゆる場所で接続可能で、そして低消費電力の通信ネットワークが必要不可欠である。本稿では、無線電力伝送(WPT: Wireless Power Transfer)を利用することで、あらゆる場所に設置可能で、低消費電力な無線中継器について紹介する。

2 無線電力伝送型の無線中継器

2.1 コンセプト及び基本機能

図1に、提案するWPT型の無線中継器の基本的なコンセプトを示す。一般的な中継器は、外部電源から有線で電力供給することで動作していたが、本中継器では、ミリ波帯の通信信号だけでなく、WPT用の信号も同時に扱うことで、無線で電力供給が可能である。WPTの信号から電力を受け取ると同時に、WPT信号をローカル信号として利用することで周波数変換を行う。また、ミリ波帯通信に必須の機能である指向性を制御するビームフォーミング機能、そして中継信号を増幅するための増幅機能を有する。ビームフォーミング機能は、各アンテナ素子における信号の位相制御を行うことで実現し、高い指向性を実現しながらその指向性を電子的

に走査可能とする。

中継器に必要な電力をコンセントやバッテリーに頼らず、無線電力伝送することにより、電源線の敷設を考慮することなく様々な場所に中継器を設置することが可能となる。送られた電力は中継器においてRF-DC変換を行い、中継器で利用可能な直流電圧に調整した上で電源として利用される。

一方、無線電力伝送で供給できる電力は限られているため、中継器自体の消費電力を大幅に削減する必要がある。限られた電力によって、中継器の周波数変換、ビームフォーミング、増幅機能を実現する。本無線機では、WPT信号をローカル信号として利用し、ミリ波帯から中間周波数帯(IF: Intermediate Frequency)まで周波数変換を行い、低い周波数とすることで、低い消費電力でも信号増幅しやすく、また信号損を少なくできる。また、WPT信号を利用することでローカル信号を生成するための周波数シンセサイザが不要となるため、その分の消費電力も削減できる。このように必要な機能を実現するための消費電力を大幅に低減することで、無線電力伝送による限られた供給電力でも動作可能になり、外部電源そして電源線を不要とすることができる。

ミリ波帯では、自由空間伝搬損が大きいため、対象の方向に対して、利得を高くするためにビームフォーミングを行って指向性を高くする必要がある。中継器においても対象のデバイスに対してビームフォーミングを行う必要がある。従来のミリ波帯フェーズドアレイ無線機によるビームフォーミングでは、電力を消費するアクティブ型移相器や、電力消

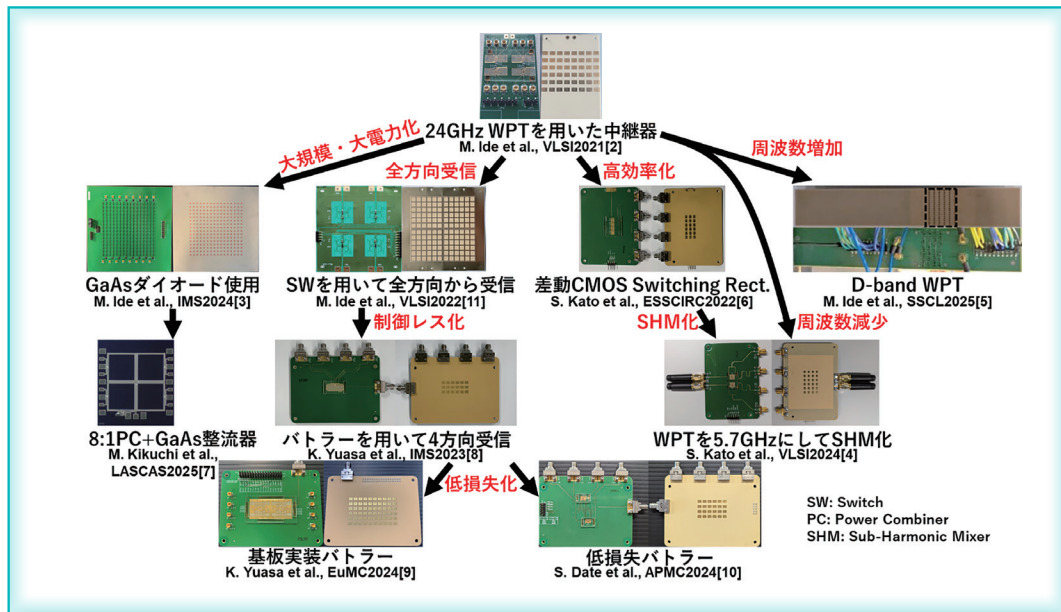


図2 研究グループによるこれまでの無線電力伝送型中継器の技術開発

費の無視できる損失の大きいパッシブタイプ移相器が必要であった。本中継器では、2.2で説明するように、WPT信号を利用したり、WPT信号の反射位相を調整したりすることで、非常に低い消費電力かつ高い分解能のビームフォーミングを可能にしている。

2.2 WPT型中継器の技術開発体系

図2に、我々の研究グループでこれまでに研究開発してきたWPT型中継器を示す。研究開発のスタートは、28 GHz帯のミリ波5G通信の中継器で、ISM (Industrial Scientific and Medical) バンドの24 GHzのWPT信号を利用して、WPT型中継器を実現した。この中継器を基として、大規模・大電力化、ビーム制御の高度化、WPTの高効率化、利用周波数の多様化という、様々な方向性で研究開発を進めてきた。以降のセクションでは、最初の

WPT型中継器⁽²⁾から、大規模・大電力化を実現した中継器⁽³⁾、周波数の多様化によって伝送距離や通信速度を向上させた中継器^{(4), (5)}について紹介する。

3

24 GHz WPTを用いたCMOSミリ波5G中継器

3.1 中継器の構成及び動作

図3に、24 GHzのWPT信号を利用しながら動作するミリ波5G中継器の構成図を示す⁽²⁾。本中継器は、ミリ波帯5G信号に対して周波数変換、ビームフォーミングを行いながら送信及び受信動作を行う。24 GHzのWPT信号をローカル信号として、28 GHz帯の5G通信信号を周波数変換するので、4 GHzのIF帯となる。このような無線通信と同時にWPTによる電力生成を行う。

送信時には、新たに考案したベクトル合成型パッ

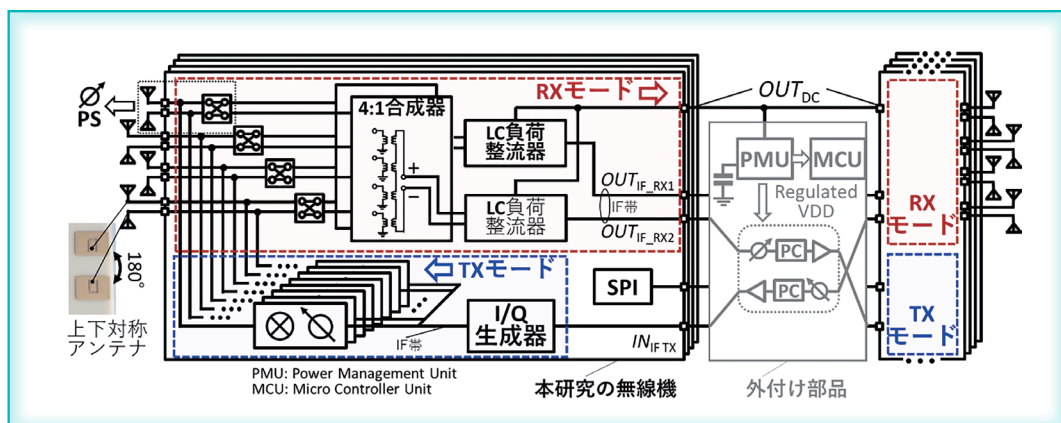


図3 24 GHz WPTを用いたCMOSミリ波5G中継器

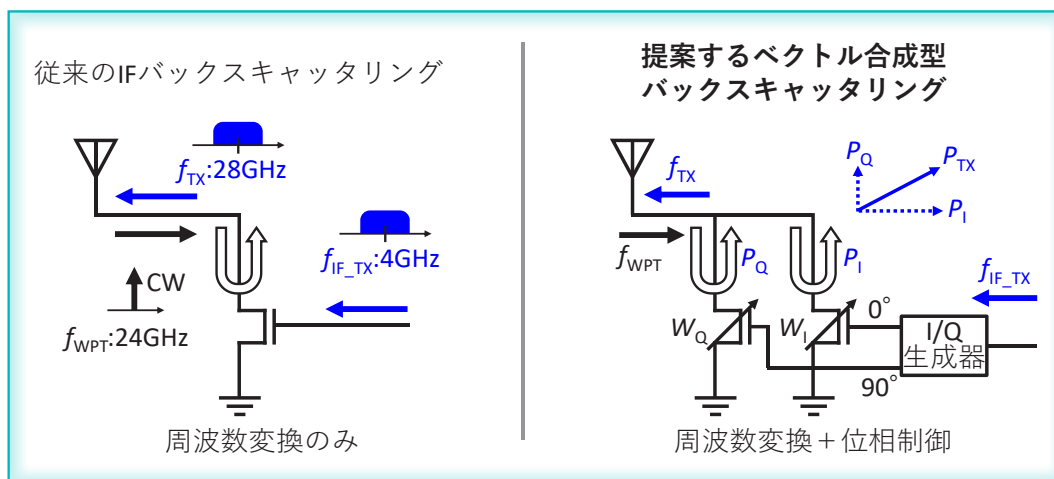


図4 提案するベクトル合成型バックスキッタリングの構成

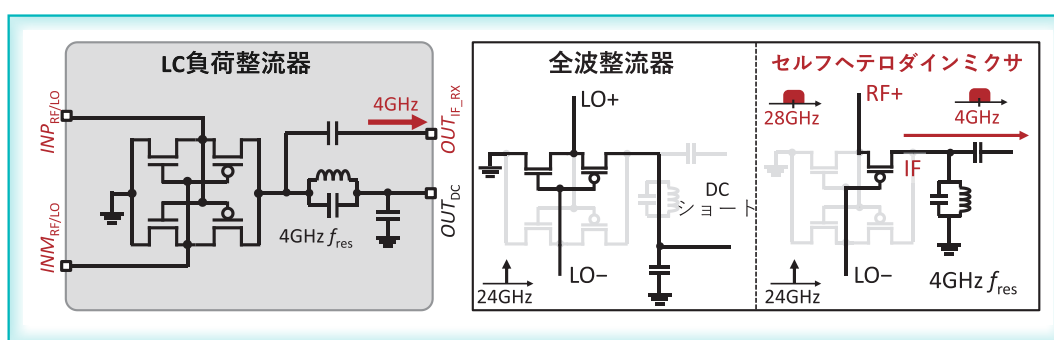


図5 受信側のLC負荷整流器の動作

ックスキャッタリングを利用することで、WPT 信号の反射位相を調整し、高い精度のビームフォーミングが可能となる。図4に示すように、従来のIF バックスキャッタリング⁽¹²⁾では、IF 信号とWPT 信号をMOSFETのゲート端子とドレイン端子に入力することによって、周波数変換は行うことができるが、位相調整を行うことができなかった。今回、提案するベクトル合成型バックスキッタリングでは、二つのMOSFETに90度位相が異なるIF信号をそれぞれ入力し、実効的なMOSFETのサイズを可変することによって、図4右上の P_I と P_Q の大きさを変化させ、0度から90度の間の任意の位相を作り出すことができる。実効的なMOSFETのサイズ可変は、5 bitのスイッチ制御で実現しており、このベクトル合成を第1象限から第4象限まで行うことで、360度の位相制御を7 bitの高分解能で実現できる。

受信時には、LC負荷整流器にWPT信号とミリ波5G信号が入力され、RF-DC変換による電力生成とRF-IF変換による周波数変換を行う。図5に、LC負荷整流器の回路及び動作を示す。回路は、全波整流器の後段にLC負荷が接続される構成となっており、LC負荷はIF帯で共振周波数を持つ。電力

生成の全波整流動作⁽¹³⁾は、n-MOSFET及びp-MOSFETの双方がダイオードとして動作することで、24 GHzのWPT信号をDC信号へと変換する。一方で、周波数変換動作は、整流器の非線形性によって、セルフヘテロダインミキサ⁽¹⁴⁾として動作し、28 GHz帯の5G信号を4 GHzへと周波数ダウンコンバートする。LC負荷によって、DC信号はインダクタを通りDC出力へ、IF信号はLC負荷のインピーダンスが高く見えるので、IF出力へ分離することができる。

3.2 試作したCMOS中継器の測定評価結果

図6に試作したCMOSミリ波5G中継器を示す。4チップの無線ICを搭載しており、32素子のフェイズドアレー無線機となっている。無線ICはシリコンCMOS 65 nmプロセスを用いて製造し、1チップに8系統のトランシーバを搭載している。2×4の8素子に対して一つの無線ICが接続される。アンテナは、24 GHzと28 GHzの双方に対応するために、スロットを入れて広帯域化を図っている。±30度のビームフォーミングを僅か30 μWの消費電力で実現している。また、32素子全てのアンテナを用いて受電し、各アンテナに対して3 dBmの

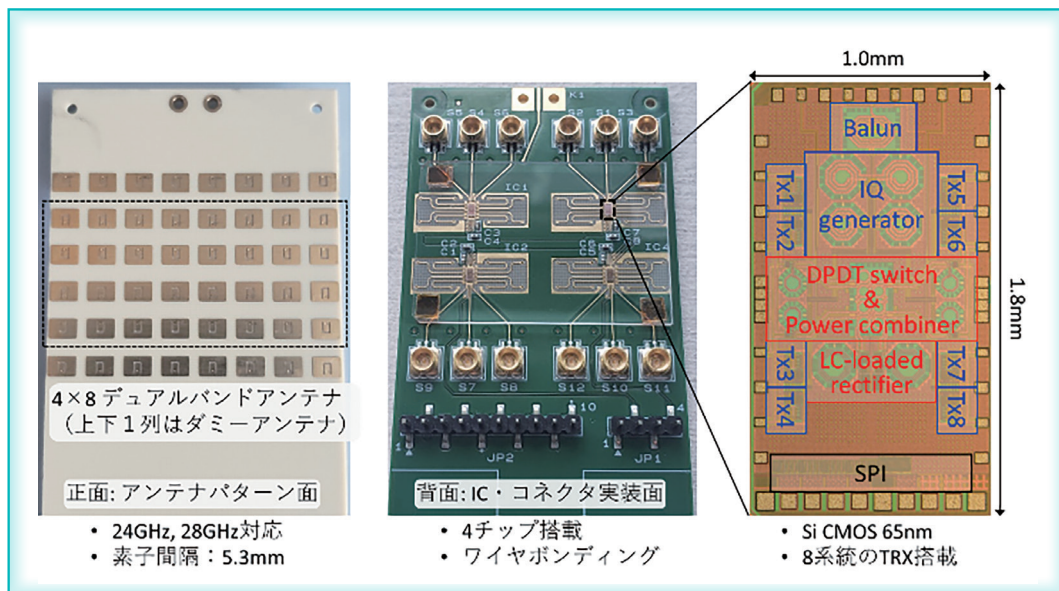


図6 試作した 24 GHz WPT 型 CMO ミリ波 5G 中継器

電力が入力されるときに 3.1 mW の直流電力を生成できることを確認した。今後 32 素子から更に大規模なアレーとすることで、中継器で必要となる増幅器やマイコンなどを動作させるのに十分な電力が供給可能となる。

4 GaAs ダイオードによる大規模・大電力 WPT 型中継器

3. で紹介した CMOS による WPT 型中継器は、直流出力電力が小さい、また試作段階においてはベアの CMOS チップを使ってアレー素子数を増やし大規模化するのが困難という課題があった。本章では、市販のディスクリート GaAs ダイオードデバイスを用いることで、容易に大規模化及び大電力化を実現できる中継器を紹介する。

4.1 中継器の構成と動作

図 7 に GaAs ダイオードをはじめとするディスクリート部品を用いて、大規模・大電力化を目指した 256 素子 WPT 型中継器の構成を示す⁽³⁾。本中継器では、一つのアンテナに対して一つの GaAs ダイオード⁽¹⁵⁾を接続し、整流及び周波数変換動作を行う。また、整流器の後段に 1 bit の移相器を設けることで、ビームフォーミングも可能としている。ディスクリート部品は集積化されていないため、分解能の高い移相器を作ることは面積制約より難しい。本中継器では、アンテナピッチが 5.3 mm となっており、5.3 mm 角に、多くの部品を持つ高分解能の移相器を実現するのは困難である。しかし、本中継器は 256 素子と素子数が多いため、各素子の 1 bit の粗い位相制御による誤差が全体として平均化され、結果としてある程度のビームフォーミングを実現可能である。

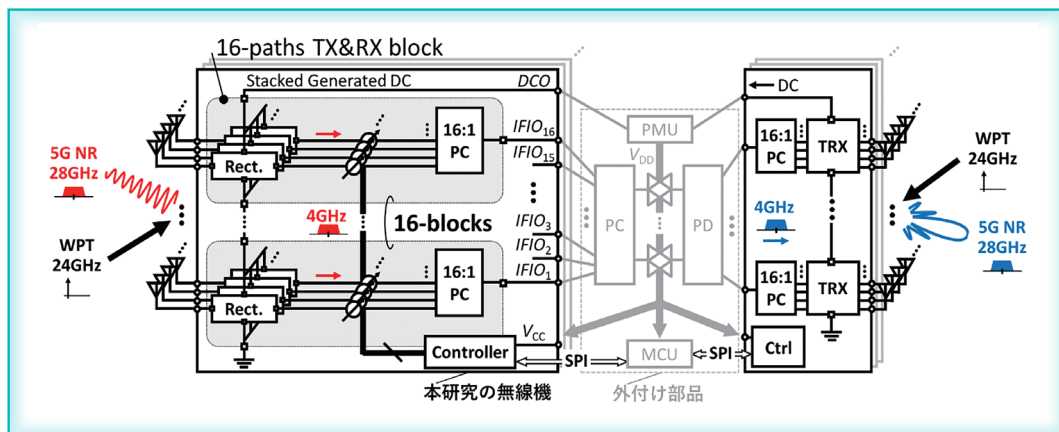


図7 GaAs ダイオードによる 256 素子 WPT 型中継器

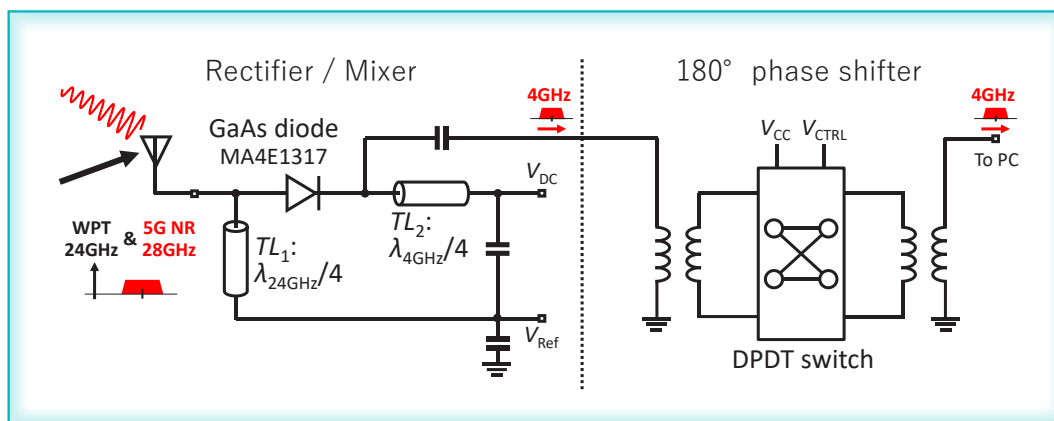


図8 1素子分の詳細回路図及び動作

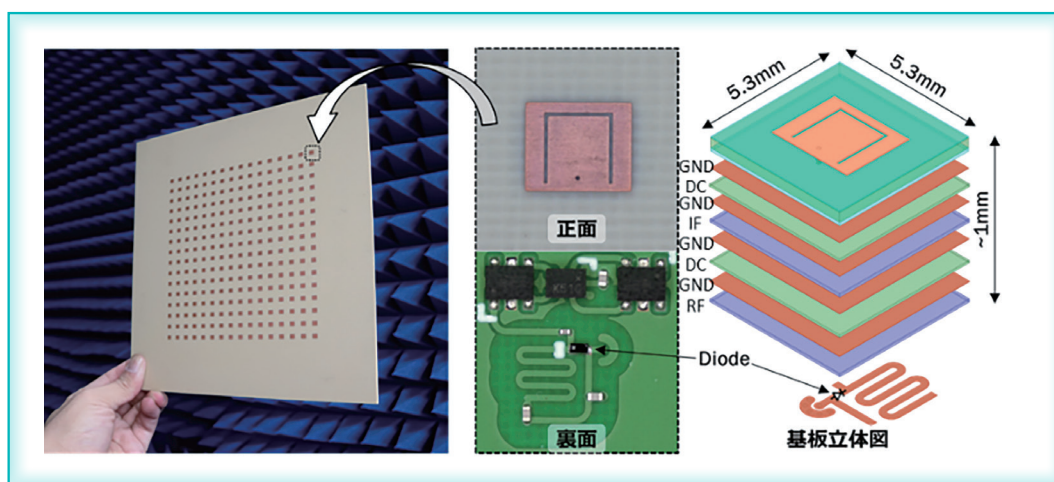


図9 試作したGaAsダイオードによるWPT型中継器

図8に、1系統分の詳細な回路図を示し、WPT及びミリ波5G信号の流れを示す。ダイオードと伝送線路で整流器が構成されており、半端整流で直流電力を生成しながら、ダイオードミキサとしても動作し、受信時には、28GHzの5G信号と24GHzのWPT信号を乗算することで、4GHz帯まで周波数変換を行う。送信時は、4GHz帯のIF信号とWPT信号がダイオードのアノード及びカソードそれぞれに入力されて、同様に乗算され、28GHz帯まで周波数アップコンバージョンが行われる。伝送線路のTL1及びTL2は、それぞれ24GHz及び4GHz帯において1/4波長となるように設計し、各周波数においてRFC(Radio Frequency Choke coil)として振る舞う。180度の1bit移相器は、バランとDPDT(Double Pole Double Throw)スイッチで構成し、差動信号の正負を入れ替えることで位相を反転させている。

4.2 試作したGaAs中継器の測定評価結果

図9に示すような256素子のアレーアンテナを持つWPT型中継器を作成した。基板はMegtron6

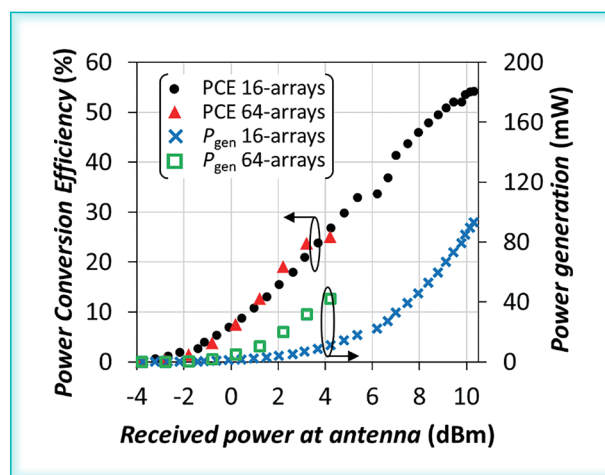


図10 WPTの測定評価結果

材を用いて、GaAsダイオード等、市販のディスクリット部品を実装している。アンテナは3.の中継器と同様に、スロットを入れることで広帯域化を実現している。本中継器をOTA(Over The Air)環境で測定評価を行い、WPTの特性では、1素子当たり54%の電力変換効率を達成し、入力電力3dBmのとき128素子の整流器の合計電力は56

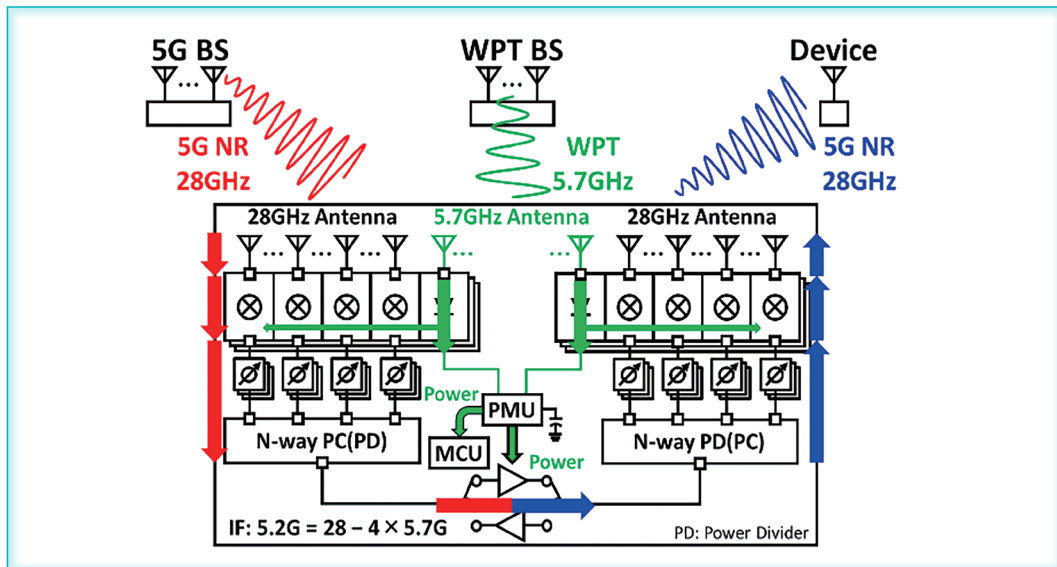


図 11 5.7 GHz 帯 WPT を利用した中継器

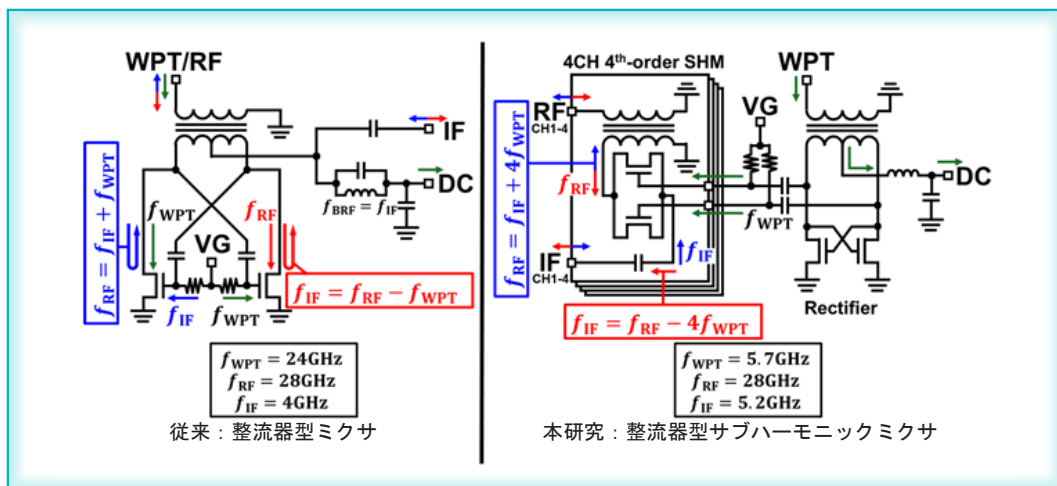


図 12 提案する整流器型 4 次サブハーモニックミキサ回路と動作

mW であった (図 10)。更に大きな WPT 電力を 256 素子全体に入力できれば、1 W 以上の出力電力が生成可能である。これは、高出力かつ高機能な中継器として動作させたときにも十分な生成電力である。また 5G NR の信号を用いて、EVM (Error Vector Magnitude) の測定を行い、送受ともに 64 QAM まで通信が可能であることを確認した。

5 WPT 周波数による中継器の高カバレッジ化と高速化

3. の 24 GHz の WPT 信号を利用した 28 GHz 帯 5G 中継器から、大規模かつ大電力化を目指した GaAs ダイオードによる WPT 型中継器を 4. で紹介した。これまでは、WPT 周波数をミリ波 5G 周波数に近く、かつ ISM バンドである 24 GHz を利用してきた。5. では、WPT 周波数を 5.7 GHz ま

で下げて長距離化を目指した中継器⁽⁴⁾、及び 122 GHz の D バンドまで上げて高速化を目指した中継器⁽⁵⁾ について紹介する。

5.1 5.7 GHz WPT によるスマートファクトリー向け 5G 中継器

WPT 周波数として 5.7 GHz を用いることで、より広い範囲かつ障害物があるような状況でも無線電力伝送が可能となる。これまで紹介した 24 GHz 帯 WPT は、ミリ波 5G のキャリア周波数に近いため、比較的低い IF との周波数変換を行いやすい反面、伝搬損失が大きく、また障害物などによって電波が遮られやすいという課題があった。そこで、ISM 帯であり、国内において無線電力伝送用の周波数として割り当てられている 5.7 GHz を利用した WPT 型中継器を実現した。

図 11 は、5.7 GHz 帯の WPT を利用したミリ波

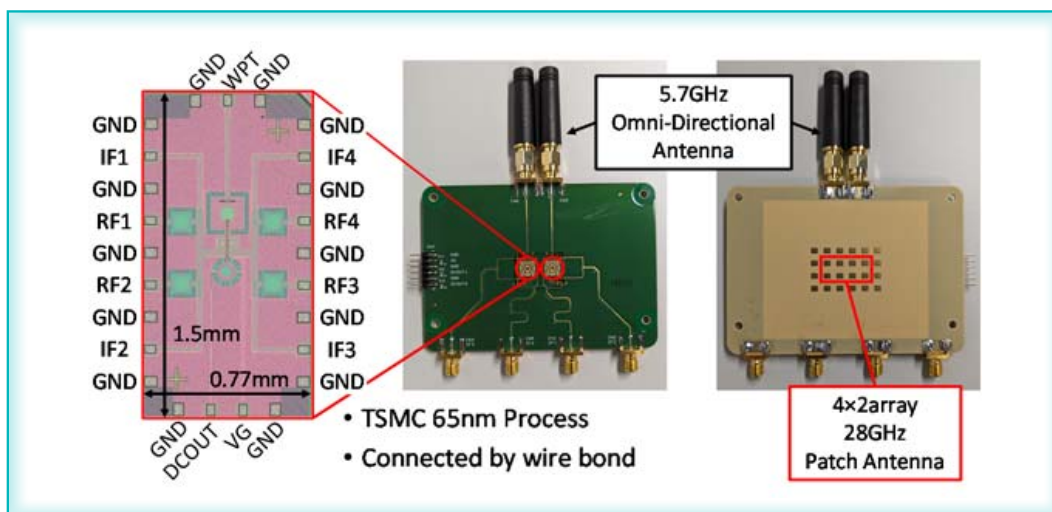


図 13 試作した 5.7 GHz 帯 WPT 型中継器

帯 5G 中継器であり、これまでの中継器と同様に、電力生成、周波数変換、ビームフォーミングといった機能を有する。しかし、一般的な乗算ミキサでは 5.7 GHz を用いて 28 GHz をある程度低い IF 帯に変換することができない。そのため、本中継器では、4 次のサブハーモニックミキサ回路を用いることで、5.2 GHz の IF 帯へと変換することを可能にした。従来の整流器型ミキサ⁽⁶⁾では、WPT の電力変換効率と周波数変換利得の間にトレードオフ関係があり、両方を同時に最大化できなかった。そこで、本中継器では、整流器とサブハーモニックミキサの役割を持つ n-MOSFET を分け、ゲート幅及びゲートバイアス電圧をそれぞれに対して最適化できるような構成とした (図 12)。

図 13 は、実際に作成した 5.7 GHz 帯 WPT 型中継器のプロトタイプであり 2 チップの無線 IC と 8

素子の 28 GHz 帯アンテナ、及び 2 個の 5.7 GHz 帯アンテナで構成している。RF-DC 変換効率は最大で 55 % である。WPT 距離は 24 GHz 帯と比べると同じ変換効率で比べたとき、整流器の効率の向上及び伝搬損の低減により、約 5 倍伸ばすことが可能となる。実際に OTA 環境で、28 GHz の 5G NR MCS19 の信号を周波数変換して、通信特性を評価し、良好な特性を確認した。

5.2 D バンドを利用した高速 WPT 型中継器

最後に 5G の次の世代の高速無線通信に向けた D バンドを利用した WPT 型中継器について紹介する⁽⁵⁾。これまで紹介した中継器のキャリア周波数は 28GHz 帯であったが、更に広い帯域を利用した高速通信が可能な D バンドに対応する中継器を作成した。キャリア周波数は 135 GHz とし、WPT

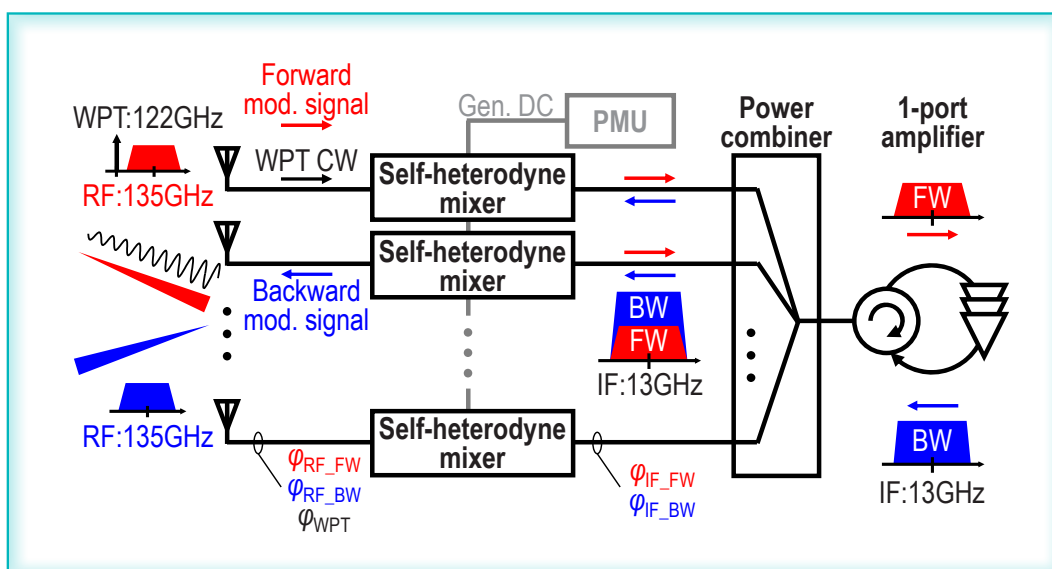


図 14 D バンド WPT 型中継器

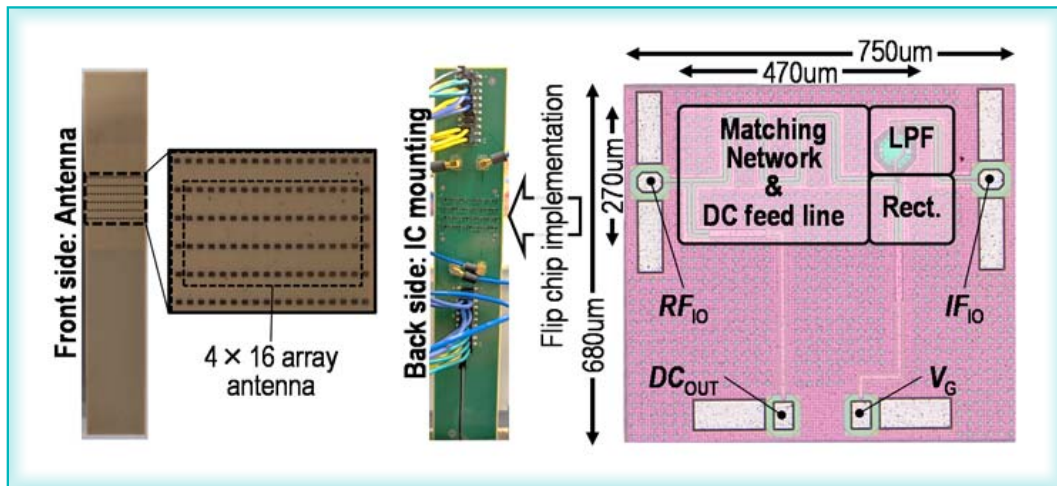


図 15 試作した D バンド WPT 型中継器

周波数は ISM バンドの 122 GHz を利用し、IF バンドを 13 GHz としている。キャリア周波数が高ければ高いほど、広い帯域を確保しやすくなり、無線通信の速度が向上する。その一方で、伝搬損失は高くなり、また増幅器の雑音や出力電力といった性能は落ちていくために、通信距離を確保するのが困難となり中継器の重要性はより高まっていく。

図 14 に、D バンドの WPT 型中継器の構成を示す。この構成では、アクティブ反射板としての動作を目指し、これまでの中継器と同様に WPT 信号を利用して周波数変換を行う。135 GHz 帯の無線通信信号を、122 GHz の WPT 信号を利用して 13 GHz の IF バンドに周波数ダウンコンバートする。そして、電力合成、増幅したのちに再度 122 GHz の WPT 信号で周波数アップコンバートし、WPT 信号の入射角に応じた反射角で反射させる。

実際に図 15 に示すような D バンドで動作する WPT 型中継器を、CMOS 65 nm プロセスを用いて作成した。122 GHz の WPT 信号において、入力電力が 9.3 dBm のとき 12.2 % の電力変換効率を達成している。また 6 GHz の広帯域な信号を用いて 64 QAM 時に 48 Gbit/s のデータレートを達成している。

6 まとめと今後の展開

本稿では、電源の敷設を必要とせず、設置場所の自由度が高く、消費電力が非常に小さい WPT 型ミリ波帯中継器について紹介した。最初のプロトタイプである 24 GHz の WPT を利用した 28 GHz 帯 5G 中継器から、大規模・大電力化、長距離化、高速化といった方向で展開させた WPT 型中継器を実現してきた。

本研究の WPT 型中継器の構成は、28 GHz 帯だけでなく、更に高い 39 GHz 帯や 60 GHz 帯、更には 100 GHz を超える周波数帯においても適用可能であり、今後の 6G 時代に向けて中継器の更なる高周波化を加速させることができる。キャリア周波数が高ければ高いほど、損失が大きく、信号の増幅に必要な消費電力は大きくなるために、アンテナから受信後すぐに中間周波数に落として増幅を行い、アンテナの直前でまたキャリア周波数に上げて出力するという、本中継器の構成は、周波数が高ければ高いほど重要性を増していく。

また、無線電力伝送は、同じ距離かつ同じアンテナサイズにおいては、伝搬損失と送受のアンテナ利得の関係から波長の二乗に反比例して、すなわち周波数が高いほど、伝送できる電力が増えていく。そのため、今後のデバイス・回路技術の進展による整流器及び電力増幅器の効率の向上とともに、本 WPT 型中継器の利用範囲は広がっていく。

究極的には、あらゆる場所で WPT が利用可能な環境が屋内・屋外問わず整備され^{(16)~(18)}、その WPT 信号を利用する中継器がきめ細やかに設置されることで、ミリ波帯通信のカバレッジの大幅な拡大を目指していきたい。

謝辞 本研究の一部は、総務省 SCOPE (192203002, 192103003, JP235003011), NICT 委託研究 (00601), JST A-STEP 産学共同 (JPMJTR211D), 総務省委託研究 (JPJ000254), 並びに東京大学 VDEC 活動を通し、日本ケイデンス株式会社、シノプシス株式会社、メンターグラフィクス株式会社及びキーサイト・テクノロジー株式会社の協力で行われたものである。

文献

- (1) 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, “ワイヤレス電力伝送技術によるカーボンニュートラル社会への貢献,” JST 低炭素社会戦略センター政策提言, 2020. <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2020-pp-04.pdf> (参照日: 2025 年 5 月 15 日)
- (2) M. Ide, A. Shirane, K. Yanagisawa, D. You, J. Pang, and K. Okada, “A 28-GHz phased-array relay transceiver for 5G network using vector-summing backscatter with 24-GHz wireless power and LO transfer,” 2021 Symposium VLSI Circuits, pp. 1-2, June 2021.
- (3) M. Ide, K. Yuasa, S. Kato, T. Tamura, K. Okada, and A. Shirane, “A 256-element phased-array relay transceiver for 5G network using 24-GHz wireless power transfer with discrete ICs,” IEEE Microw. Wirel. Technol. Lett., vol. 34, no. 6, pp. 793-796, June 2024.
- (4) S. Kato, S. Date, T. Ruoxin, Y. Narukiyo, H. Hayashi, and K. Yuasa, “A 28GHz 5G NR wirelessly powered relay transceiver using rectifier-type 4th-order sub-harmonic mixer,” 2024 IEEE Symposium on VLSI Technol. and Circuits, pp. 1-2, June 2024.
- (5) M. Ide, K. Yuasa, S. Kato, S. Date, T. Tomura, and K. Okada, “A 122GHz wirelessly powered active reflector for D-band communications,” IEEE Solid-State Circuits Lett., vol. 8, pp. 97-100, March 2025.
- (6) S. Kato, K. Yuasa, M. Ide, A. Shirane, and K. Okada, “A CMOS full-wave switching rectifier with frequency up-down conversion for 5G NR wirelessly-powered relay transceivers,” IEEE ESSCIRC, 2022, pp. 345-348, Sept. 2022.
- (7) M. Kikuchi, M. Ide, J. Mayeda, S. Kato, K. Yuasa, and K. Okada, “Millimeter-wave GaAs rectifier with differential signal 4:1 power combiner for simultaneous wireless information and power transmission,” IEEE LASCAS, Feb. 2025.
- (8) K. Yuasa, M. Ide, S. Kato, K. Okada, and A. Shirane, “Beam control free 28GHz 5G relay transceiver and 24GHz wireless power receiver using on-chip butler matrix,” 2023 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, pp. 199-202, June 2023.
- (9) K. Yuasa, M. Ide, S. Kato, T. Tomura, K. Okada, and A. Shirane, “5G NR transceiver and 24GHz wireless power receiver utilizing a low insertion loss differential output butler matrix for long-range wireless transmission,” 2024 European Microw. Conf., pp. 892-895, Sept. 2024.
- (10) S. Date, K. Yuasa, M. Ide, S. Kato, K. Okada, and A. Shirane, “Beam control free transceiver using CMOS 4×4 matrix for 5G relay communication and wireless power transfer,” IEEE Asia-Pacific Microw. Conf., pp. 713-715, Nov. 2024.
- (11) M. Ide, K. Yuasa, S. Kato, D. You, A. A. Fadila, and J. Pang, “A 28-GHz fully-passive retro-reflective phased-array backscattering transceiver for 5G network with 24-GHz beam-steered wireless power transfer,” IEEE Symposium VLSI Technol. and Circuits, pp. 96-97, June 2022.
- (12) A. Shirane, Y. Fang, H. Tan, T. Ibe, H. Ito, and N. Ishihara, “RF-powered transceiver with an energy- and spectral-efficient IF-based quadrature backscattering transmitter,” IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 50, no. 12, pp. 2975-2987, Dec. 2015.
- (13) K. Kotani, A. Sasaki, and T. Ito, “High-efficiency differential-drive CMOS rectifier for UHF RFIDs,” IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 44, no. 11, pp. 3011-3018, Nov. 2009.
- (14) Y. Shoji, K. Hamaguchi, and H. Ogawa, “Millimeter-wave remote self-heterodyne system for extremely stable and low-cost broad-band signal transmission,” IEEE Trans. Microwave Theory Techn., vol. 50, no. 6, pp. 1458-1468, June 2002.
- (15) S. P. Gao, W. Hu, H. Zhang, and Y. Guo, “Millimeter-wave rectifiers using proprietary Schottky diodes: diode modeling and rectifier analysis,” Proc. Wirel. Power Week (WPW), pp. 180-184, July 2022.
- (16) 東芝インフラシステムズ株式会社, “東芝マイクロ波給電技術とは.” <https://www.global.toshiba/jp/products-solutions/social/telecommunication/microwave-power-supply/about.html> (参照日 2025 年 5 月 15 日) .
- (17) ソフトバンク株式会社, “未来の充電はワイヤレスに. 電力の世界に変革をもたらす無線電力伝送,” ソフトバンクニュース, 2022 年 6 月 22 日 . https://www.softbank.jp/sbnews/entry/20220622_02 (参照日 2025 年 5 月 15 日) .
- (18) 京セラ株式会社, “「空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム」を実現する基礎技術を開発,” 2023 年 10 月 11 日 . <https://www.kyocera.co.jp/newsroom/news/2023/002277.html> (参照日 2025 年 5 月 15 日) .

(2025 年 4 月 7 日受付, 5 月 15 日再受付)

白根篤史 (正員)

2010 東工大・工・電気卒. 2012 同大学院修士課程了. 2015 同博士課程了. 博士(工学). 同年(株)東芝入社. 2017 日本電産株式会社入社. 2018 東工大助教. 2022 同大学准教授. 2024 東京科学大准教授. 現在に至る. 無線通信, 衛星通信, 及び無線電力伝送向け集積回路の研究に従事. IEEE 会員.





アナザースカイでの成長 ～スイス研究留学記～

徳島大学 上手洋子 Yoko Uwate

若者よ、
世界に
出よう！

1 はじめに



私は2024年8月下旬から2025年3月下旬まで7か月間、スイス・チューリッヒ州にあるチューリッヒ応用科学大（ZHAW: Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften）で研究活動を行いました。利用した制度は私が所属する徳島大の「若手教員海外派遣支援事業」です。私にとって今回は三度目の海外留学でしたが、本稿では、留学を考えている若手研究者の参考になるよう、準備段階から現地での研究生活、得られた経験について紹介します。

2 留学準備



2.1 事前準備

海外留学するにあたって、場所選びは非常に難しい問題の一つだと思います。私はこれまで、二度の海外留学の経験がありますが、どちらもスイス・チューリッヒにあるチューリッヒ大とETH（Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, スイス連邦工科大チューリッヒ校）の合同研究機関であるニューロ情報研究所（Institute of Neuroinformatics, UZH/ETH）のStoop教授の研究グループで研究活動を行いました。

今回の場所選びで難しかったのは、Stoop教授が退官されて研究グループがなくなってしまったこと、また円安でした。円安のため欧米での生活費は高額になると推測できました。そのため、アジア地域（韓国、台湾、マレーシアなど）での留学先を検討しました。しかし、今回の海外留学の目的は、新しい研究テーマへの挑戦でした。そのため、難しいかもしれないけれど自分が一番やってみたい研究テーマができる国に行こう！と立ち返りました。それが私にとってはやはりスイスでした。

スイスでは脳情報やニューロモルフィックについての研究が盛んに行われており、私もその研究に挑戦しようと思いました。以前の研究グループはもうなかったのですが、Stoop教授の研究グループで以前留学したときに共に研究活動を行っていた、Ott教授が現在在職しているチューリッヒ応用科学大を留学先と決めました。その後は、Ott教授にメールで状況を説明し、招待状などの作成をお願いしました。

次にアパートを決める必要がありました。今回の滞在は7か月間でしたので、家具付きのアパートメントホテルにすることにしました。インターネットで幾つかの会社のホームページから気になる部屋があればコンタクトをして、交渉を行いました。最初の何部屋かは、退居者との時期が合わず借りられなかったのですが、出国間近になって、チューリッヒ市内の長期滞在者用のアパートメントホテルを借りることができました（図1）。私が利用したアパートの管理会社とは、アプリで入居方法の連絡や家賃の入金を行うことができたので非常にスムーズでした。（入居後もお湯が出ないとか、電球が切れたなどのトラブルがありましたが、アプリのチャット機能ですぐに対応してくれました。）



図1 家具付きアパートの部屋の様子



図2 チューリッヒ市の区分役所入口と中の様子

2.2 スイスでの生活準備など

現地に到着してから最初の2, 3日は、滞在許可証の申請手続きや日用品の買い物をする必要があります。スイス・チューリッヒ州では、地域がKreisという区分で分かれており、各区分の役所に行って滞在許可証の申請をする必要があります(図2)。以前の書類は全てドイツ語で手書きでしたが、今回の書類は電子で英語版もあり、Web申請もできたのでとても楽でした。最初に仮の滞在許可証が配布され、指紋認証や顔写真の撮影など生体認証を行って、正式な滞在許可証が発行されました。

3 チューリッヒ応用科学大での研究事情

3.1 場所と研究環境

チューリッヒ応用科学大で私が滞在した計算生命科学研究所は、チューリッヒ市内から電車で20分のところにあるWadenswilという街にあります。Wadenswilはチューリッヒ湖のすぐそばなので、電車からはとてもきれいなチューリッヒ湖と湖岸の住宅街、また天気の良い日は遠くアルプスを見ることができました(図3)。駅から研究所までは徒歩で10分程度ですが、研究所が小高い丘にあり、最



図3 研究所からの景色



図4 小高い丘の上にある研究所



図5 元はお城だった研究所の建物

後が急な坂道になっているので、研究所に着く頃にはいつも息切れしていました(図4)。研究所は昔のお城を改築した建物で、歴史がありとてもおしゃれでした(図5)。レクチャールームが3部屋あり、そのほかは研究者の部屋が研究グループごとに6, 7部屋あるというような建物でした。私が研究していた部屋も8人の研究者が同じ部屋でした(図6)。私が所属している徳島大では教員室は普段一人で利用しているので、8人の部屋は何か職員室のような雰囲気があり、とても新鮮でした。ただ、オンライン会議をするとほかの人の迷惑になってしまうため、個室のほかの部屋を探す必要がありました。ほかの研究者も同じような状況で個室を探しており、個室の部屋が一杯のときは、廊下の邪魔にならないところなどでオンライン会議をすることなどもありました。



図6 研究所内の筆者のデスク

3.2 1日のスケジュール

1日のスケジュールを紹介します。朝はみんな大体8:30ぐらいから始業していました。学食が研究所の建物から5分ぐらい歩いた別の建物にあるので、11:30ぐらいに研究グループのメンバーで昼食に行っていました。一つの研究グループ4、5人で行くときもあれば、複数の研究グループ10人ぐらいで行くときもあり、ランチ時間は貴重な情報交換の場になっていました（図7、8）。ランチ後は研究所内にあるキッチン（図9）でみんなとカフェをして、午後の仕事に戻るといった感じでした。週に1度（月曜日から火曜日の午後）、研究グループミーティングで研究の進捗状況の確認や今後の研究プランを議論していました。その後、17:30ぐらいには帰宅す



図7 ランチの様子（天気がいい日は外でランチ）



図8 ランチの一例

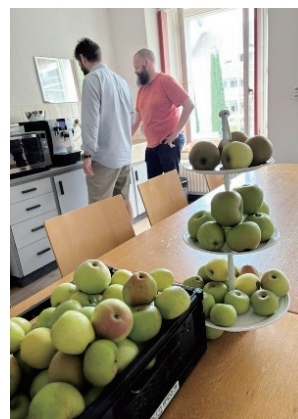


図9 研究所のキッチンルーム

ることが多かったです。日本よりもランチやカフェの時間が長く、その分、同僚といろいろな話ができるので、互いのことがよく理解できたと思います。そのせいか、研究所メンバーのチーム感をすごく感じました。

金曜日のランチは、餃子好きメンバーで駅周辺のキッチンカーの餃子を食べに行っていました（図10、11）。その店名が「MOMO」なので、研究所では金曜日をMOMO dayと呼んでいました。MOMO dayのリーダー、エリックによると、餃子食べて、その後スーパーでアイスクリームを食べ



図10 MOMO 弁当



図11 MOMO（餃子）弁当を食べる様子



図 12 ICLS (Institute of Computational Life Science) -Day のオープニング

るのが伝統だ！と言っていました。冬は寒くてアイスクリームは食べられませんでした。

3.3 イベントなど

留学をスタートさせてちょうどすぐに、研究所のイベントに参加しました（図 12）。イベント名は、ICLS (Institute of Computational Life Science) -Day で、研究所メンバー全員が参加して、研究所のこのセメスターのゴールの共通認識を行うこと、研究所内メンバーの交流が目的のイベントでした。私は英語でも参加可のプログラムに参加しました。

午前中は、Research exchange speed dating に参加して、4 人の教員 & ドクター学生とスピードデートしました（図 13）。スピードデートとは、1 人につき 20 分ぐらいで研究所の敷地内を自由に散歩しながら、互いの研究やこれまでのキャリアを紹介し合って互いを理解するというものでした。4 人みんなの共通点はとても日本好きということでした！弟が日本好きで日本語教室に通っているとか、娘さんが来週から日本の大学に留学するとか、アニメーター出身のユリアンとは研究よりほぼジブリ映



図 13 ICLS-Day の午前のセッションで一緒だった研究所のメンバー

画の話をしていました。娘さんが早大に留学予定のスフェンは、アートもやっていて専門はフードサイエンスだそうです。何かみんな一つの専門ではなくて、いろいろ経験している人が多いのにびっくりしました。

ランチ後にチームイベントとして、研究所内のいろいろなところにある QR コードを読むゲームをして、最後は Turning teaching pain points into points of progress のセッションに参加しました。教員の立場として、どんな風に教育すればいいのかをディスカッションできてよかったです。あと、イベントを通してほぼ携帯スマートフォンで参加する形式だったのが面白かったです！グループディスカッションでは意見をうまく言えなかった場面もあったので、もっと自分の意見をしっかり伝えられるようにしていきたいと感じました。

スイスの研究所生活にもすっかり慣れた年明けの 2025 年 1 月に、Computational Life Science Day というイベントに参加しました（図 14）。これは、研究所とそれをサポートしてくれている企業との合同イベントで、研究所からは研究プロジェクト紹介を、企業サイドからは製品紹介を行うといった内容でした。研究所が注目しているテクノロジーとしてデジタルツインの技術が紹介されました。スポンサーの一つの NEURA という、ロボットを製造しているドイツ企業からは、ヒューマノイドロボット研究の現状についての紹介がありました。本イベントにはチューリッヒ応用科学大の学生も多く参加しており、企業との交流の場として非常に良いイベントであったと思います。

このように、研究所主催のイベントがセメスターに 1 回はあり、研究所チーム全体の交流や、研究所と企業の交流などネットワーキングが効果的に行われていることを実感しました。



図 14 Computational Life Science Day のオープニング



図 15 After-Work-Beer-Meeting の様子



図 17 締めのケバブ (ボリューム満点です)

また、ソーシャルイベントとしては、研究所全体として After-Work-Beer-Meeting というのが2か月に1回ありました(図15)。研究所のスタッフたちが中心となって企画してくれているイベントで、仕事終わりに研究所メンバーで食事をするというイベントでした。ここでは、研究グループを越えて、研究内容だけでなく、プライベートな内容も話せるので、良い交流の場となりました。私はドクターの学生たちと日本の漫画の話をしたりしました。また、研究者のタティアナとはハイキングの話などで盛り上がりました。

研究所全体のソーシャルイベントのほかに、研究グループごとでのソーシャルイベントも効果的にオーガナイズされていました。私はマーティングループに所属していたので、マーティングループの食事会には必ず参加していました(図16)。まず、19:00 ぐらいにマーティンがお気に入りのバーに集合してビールを飲みながらいろいろな話をします。マーティンが指導する学生、ティモはとても早口なので会話を聞き取るのが大変でしたが、何回か言い直してもらって何とか会話していました。たわいも

ない会話がが多いのですが、必ず研究プロジェクトの話題になります。この議論がとても重要で、一気にプロジェクトが進むような感じがします。22:00 ぐらいまで同じバーで飲んで、締めにケバブを食べに行く(図17)というのがマーティングループの流れです。日本でいう「締めのラーメン」がケバブに相当するようなのですが、私にとってケバブは重かったです。(味はとてもおいしかったです。)研究グループによってソーシャルイベントの頻度は違いましたが、必ずクリスマスディナーイベントはやっているようでした(図18)。

ヨーロッパの文化を感じました。日本では、Z世代で会社の飲み会は参加したくない人が増えているようですが、スイスでは若手研究者や学生も多く参加しているようでした。開催の頻度がそれほど多くないというもありますし、それまでに上司の立場の人と信頼関係が築けているからだと思いました。それは、スイスの研究生活のゆったりとしたランチや、カフェでのたわいもない会話などから得られているのかなあ、と推測しています。



図 16 マーティングループのソーシャルイベント



図 18 研究所メンバーでピザパーティ

4 スイスの生活事情



4.1 言語

スイスの公用語はドイツ語、フランス語、イタリア語、ロマンシュ語の四つあります。私が滞在したチューリッヒはドイツ語圏でした。しかし、スイスのドイツ語圏で話されるドイツ語はドイツで話される標準ドイツ語とは全然違う言語でした。ドイツ人もスイスドイツ語は分からないそうです。私は、研究所での同僚との会話は基本的に英語で行っていました。町中での買い物なども基本的には英語が通じるので、特に問題はありませんでした。

4.2 交通

チューリッヒ市内の交通は、トラムとバスが運行しており、非常に便利です。私は半額パスというチケットを持っていて、利用するゾーンを指定した定期券を購入していました。市内の買い物は基本的にトラムとバスで十分でした。少し遠出する場合は電車を利用していました。スマホアプリがあり、時刻表で電車を調べてチケットを購入できるので非常に便利でした。スイスの交通で面白い点があります。それは、駅に改札がないことです。なので、電車やトラム、バスに乗る際に何のチェックもありません。最初の頃は、えっ、何のチェックもしなくていいの？と思っていましたが、慣れればとても楽です。駅のホームのどこからでも電車に乗ることが可能です。駅もとてもオープンです。たまに、職員の人が見回りに来たら、チケットを見せればOKでした。チケットを持ってないと罰金を払うというシステムです。大体の人がチケットを買っていますが、たまに買っていない、間違って買っていて罰金の書類を書かされている人がいます。また、カーシェアも頻繁に利用されているようでした。私はスイスでの自動車免許がなかったので、留学中は車の運転はしませんでした。

4.3 スーパーとパン屋

スイスには2大スーパーとしてCoopとMigrosがあります。「みんなどっち派？」となるほど、有名なスーパーです。どちらも庶民的で各地区に一つはどちらのスーパーもあります。大体同じようなものを売っていますが、それぞれ自社製品ブランドがあり、特徴を出しています。私は、以前は断然Migros派（Migrosの方が少し安く庶民的な印象）でしたが、今回Coopの新たな発見が幾つかあり、両方のスーパーを利用していました。例えば、トーストパンはCoopの方がおいしいとか、Migrosにはおいしいトリュフチョコヨーグルトがあるとかで



図19 パン屋さんのディスプレイ（どのパンもおいしいです）

す。あと、Migrosにはお酒が売っていません。なので、お酒を買う場合はCoopに行っていました。大体朝7:00ぐらいから開いているのですが、夜閉まるのが早いのと、日曜日は中央駅以外のスーパーは完全に閉まります。なので、土曜日は買い物デーになっていました。

スイスの「パン屋さん」は本当に最高です。どのパン屋も見たい目は「魔女の宅急便のパン屋さん」のようなディスプレイです（図19）。日本のパン屋のように自分でトレーを持ってトングで好きなパンを取るというのはせずに、店の人にどのパンをどれだけ欲しいか伝え、お店の人が紙袋に入れてくれます。なので、パンの名前はドイツ語（スイスドイツ語）で言える必要があります。パンの名前は一杯覚えましたが、パン屋も朝6時ぐらいから開いています。また日曜日にも開いているパン屋も増えました。とにかくなぜかスイスの朝は早いです。

4.4 豊富な乳製品（牛乳、チーズ、ヨーグルト）

スイスは乳製品がとても豊富です。牛乳は日本でもメジャーな白と黒のホルスタイン種と茶色一色のジャージー種の2種類があります。どちらも新鮮でとてもおいしいです。ただ、日本より賞味期間が少し短い。あと、賞味期間が過ぎて廃棄を少し忘れていると、冷蔵庫の中でヨーグルト状になっています（汗！）。チーズの種類もとても豊富です。私はチーズが余り好きではなかったのですが、スイスの本場のチーズを食べるようになってから、特にグリュエールチーズが好きになりました。ヨーグルトの種類も多くあります（図20）。日本ではないようなフ



図 20 スーパーのヨーグルトコーナー

レーバーもたくさんあります。私が好きなのは栗ヨーグルトで秋・冬の期間限定で販売されていました。そのほかにもルバーブというフキ科の野菜のヨーグルト、コーヒー味やチョコレート味のヨーグルトもあります。どのヨーグルトもおいしいので、スーパーに行くとヨーグルトを選ぶのが楽しみの一つでした。

4.5 サッカー観戦

スイスのプロサッカーリーグはスーパーリーグと呼ばれています。チューリッヒにはFCチューリッヒとグラスホッパーチューリッヒの2チームが1部リーグに所属しています。私は昔からFCチューリッヒのファンで、友人がチケットを取ってくれると一緒に観戦していました。今回の留学期間中も一度、FCチューリッヒのホームスタジアムに同僚たちと観戦に行きました（図 21）。チケットは



図 21 サッカー観戦の様子。発煙筒の煙も。

スマホで購入でき、入場もスマホのコード読み込みで簡単でした。セキュリティチェックもあるのですが、少し甘いところもあるようで、試合中に発煙筒がたかれて、ヨーロッパの本場のサッカースタジアムの臨場感を体験することができました。そのときの試合は、ベルンのヤングボーイズとの一戦でしたが、惜しくも3対2で負けてしまいました。前半にFCチューリッヒのディフェンダーがファウルでレッドカードをもらって退場となってしまい、1人少ない中での試合だったのですが、守りに転じることなく攻め続けた姿勢がとても印象的でした。

5 スイスの夏休暇&冬休暇の過ごし方



5.1 夏休暇

夏のスイスでの休暇の過ごし方は、1週間ぐらい山小屋に行ってハイキングを楽しむことです。私は、スイスでお世話になっているファミリーの夏休暇に、週末の2泊お邪魔させてもらいました。場所はグラウビュンデン州でチューリッヒから車で3時間かけて行きました。山々に囲まれてまさにアルプスの少女ハイジのような世界でした（図 22, 23）。

着いた日はお天気も良く、近くを軽くハイキングしました。山小屋では携帯の電波が入らず、外部と遮断された状況でした。夜はみんなでカードゲームを楽しみました。最近では、テレビゲームやスマホゲームが多いので、カードゲームは久しぶりでしたが、アナログの面白さもあり楽しかったです。次の日はあいにくの雨でしたが、2,500 m ぐらいの山登りをしました（図 24, 25）。何度も挫折しそうになりましたが、最後まで登りきれてよかったです。山小屋でカフェをして下山しました。最終日は近くを散策して、マイナスイオンを思い切り吸収することができました。帰りは電車でチューリッヒまで戻りました。電車の旅も窓から見える景色がきれいで最



図 22 夏山の景色



図 23 山小屋の外観とそこで食べたチーズ



図 26 スイスのスキー場とカフェテリア

高でした。

5.2 冬休暇

チューリッヒ州では2月の上旬にスキーホリデーというのがあるそうです。チューリッヒ州の学校は1週間休みになるようです。またまた私は、スイスでお世話になっているファミリーのスキーホリデーに2泊お邪魔させてもらいました。サンモリッツの近くの村のアパートに滞在しました。アパートか



図 24 雨の日の山の様子



図 25 雨の日の山登り

らスキーのゴンドラまで、スキーで（クロスカントリーみたいに）行くことができました。私はスキー初心者だったので、もうこの時点で汗だくになっていました。ゴンドラで上まで上がった後、レベルによってコースが分かれていました。初心者は青コース、中級者は赤コース、上級者は黒コースでした。最初はまず青コースで練習して、それからは赤コースを滑りました。日本のスキー場よりも雪は少し硬い印象がありました(図 26)。コースはとても広く、伸び伸びと滑ることができました。スイス人のスキーレッスンはとてもスパルタだったので、短時間で上達することができました(笑)。

このようにスイスでは、休暇は大自然と触れ、家族と過ごすとても大事な時間として認識されています。このようなゆとりがあるから、仕事の生産性も高いのではないかと思います。

6 若手研究者へのメッセージ



現状だと物価高や円安の影響で、海外留学のハードルが昔より上がっているように思います。そういう逆境にめげずに、若い皆さんには海外に行って、教科書や本に載ってないことを知って、体験して、そして経験に変えてほしいです。海外留学において最先端の研究技術の習得も大切だとは思いますが、一番大切なのは海外の友人を作ることだと思います。私は海外の友人たちから研究以外の、人生をより豊かに楽しむ秘訣のような多くのことを学びました。そして、友人からまた次の友人へとつながってネットワークになっていき、どんどん新しい世界を見ることができました。私自身は学校の成績が良かったわけでも、研究業績がすごいわけでもないのですが、今、こうして大学教員としてやっていけるのは、海外経験から得られた自信があるからだ

と思っています。

今回の留学経験もこの歳でしか得られない研究のアプローチ方法や、学生指導に対しての考えなどを新しく吸収することができました。一歩踏み出すのは勇気がいるかもしれませんが、踏み出してさえしまえば、後はもうプラスになることしか起こりません。自分の可能性を信じてどんどん世界に羽ばたいて下さい。そして皆さんがそれぞれの「アナザースカイ」を見つけて、人生がより豊かになることを願っています。

7 おわりに



今回の海外留学での出来事や感じたことをざっとばらんに書かせて頂きました。この記事で少しでも若手研究者の皆さんが海外留学に興味を持ってもらえれば幸いです。最後になりましたが、この海外留学でお世話になった皆様に厚くお礼を申し上げます。

上手洋子（正員）

2003-03 徳島大・工・電気電子卒。
2006-09 同大学院博士後期課程了。同年、
同大学院特別研究員。2010-04 同大学院
ソシオテクノサイエンス研究部・助教、
2017-04 同大学院社会産業理工学研究部・
准教授。IEEE、信号処理学会各会員。



工学院大学 VR プロジェクト： IVRC 2024 決勝出場への道のり

工学院大学 牛田啓太 Keita Ushida

1. はじめに

IVRC (Interverse Virtual Reality Challenge)⁽¹⁾ は、日本バーチャルリアリティ学会⁽²⁾ が主催する、バーチャルリアリティ (VR) 技術を主に用いたインタラクティブ作品を競うチャレンジ (コンテスト) である。作品は、学生を中心としたチームで制作する。1993 年に始まり、実施形態を変えながら 30 年以上続いている。現在 (2024 年度) は、企画書を提出して審査される書類審査、実機を制作して展示する予選大会の SEED STAGE、ここでの上位作品が集められる決勝大会 LEAP STAGE の 3 段階で競われる。

本稿では、工学院大学 VR プロジェクトの IVRC 2024 への挑戦を、筆者の取材と IVRC チームへのインタビューで紹介する。工学院大学 VR プロジェクトは、86 件の応募の中からの 10 件の一つとして、LEAP STAGE まで進出した。

2. 工学院大学 VR プロジェクト

工学院大学 VR プロジェクトは、スマートフォンを利用した拡張現実感、ヘッドマウントディスプレイ



図 1 工学院大学 VR プロジェクトの活動の様子

イ (HMD) など身近になった VR 技術を背景として、2019 年に発足した。2024 年度は、105 人が所属している (活動の様子は図 1)。これは、VR 関連の学生団体としては国内でも有数の規模である。その活動は、VR 関連技術を習得し、作品を制作したり展示したりすること。IVRC への参加は、その中の主な一つである。2022 年度から応募を始め、その IVRC 2022、続く IVRC 2023 では SEED STAGE まで進出した。2024 年度は SEED STAGE 突破を目指すべく、前年度の 3 月に IVRC チームを立ち上げた。

本稿では、IVRC に参加した大谷駿介さん (情報学部情報通信工学科 3 年)、山下朋也さん (情報学部情報通信工学科 2 年)、竹島光一さん (情報学部情報デザイン学科 2 年) の話も交えて、LEAP STAGE までの道のりを紹介する (以降、敬称略)。

3. 書類審査

IVRC 最初の関門は書類審査である。概要と 9 ページ以内の企画書を提出する。この審査に通過しなければ、実機審査はない。締切は 5 月 31 日。新入生は大学生活に慣れながらの取組みである。

IVRC チームは、連日議論の場を持った。空きコマや授業終了後に、学生ラウンジなどに集まってアイデアを議論した。50 個以上のアイデアの種を出したあと、絞っていく。10 個程度まで絞り、新規性を考慮し、過去の作品を研究し、作品の魅力を吟味し、実現性を考慮して、うち 3 件に応募することにした。

「打合せスペースを借りて、アイデアをプレゼンし合ったりしました。それに基づいてメンバーで議論し合うと、ホワイトボードがあつという間に一杯になりました」(竹島)

「体験する側も作った側も、面白いと思える企画を応募できるよう、議論を重ねた自信はありまし

た」(山下)

企画書を作成し、応募する。企画書は論文と同じような形式で、ダブルブラインド方式で審査される。チームの面々は、審査結果を待った。そして、3件のうち1件が書類審査を通過した。総応募数は86件、通過作品は21件であった。

4. グラビティ・パラドックス

書類審査を通過し、SEED STAGEへ進出することになった作品は「グラビティ・パラドックス」である。着想は「私たちが地上に縛り付ける重力をVR世界では操りたい」だった。そのとき目に留まったのが、マウリッツ・エッシャー(1898～1972)の作品『相対性』(作品の画像は、例えば文献(3))である。階段が張り巡らされた奇妙な部屋。この作品の中には、決まった「重力の向き」がない。描かれている人物は、それぞれの「下向き」に対して立っている。制作する作品のストーリーは、このような奇妙な空間をVRで再現し、様々な向きに変わる重力を体験しながら、この空間から脱出する、に決めた。

設計した体験の流れはこうである。体験者は奇妙な洋館(洋館なのは、エッシャーの『相対性』をモチーフとしている。)の中にいる。ビークルに乗って移動し、この館からの脱出を目指す。この館には、ある場所から見たら、天井に扉があったり床から廊下が続いていたりする。ここでビークルの特別な機能が活躍する。ビークルは「重力の向きを変える」ビームを発射できる。このビームが当たった面が「下」になり、その「下」に向けてビークルが、調度品が、落下する。新しい「下」を床面にして、ビークルは館の中を進んでいく。

かくして、9月のSEED STAGEでの実機審査を目指して制作が始まった。制作期間は3か月。この期間に、実機の詳細な仕様を設計し、コンテンツとともに実装しなければならない。

5. 制作: SEED STAGEに向けて

2024年度のIVRCチームは、1年生2人、2年生9人、3年生2人の計13人である。ほかの団体に比べてチームの人数は多い。3月に立ち上げた後、新年度で2人の新入生を迎えている。

作品制作の核として用いる環境は、ゲームエンジ

ンのUnity⁽⁴⁾と決めていた。2年生以上はプロジェクト内の勉強会などで使用経験があったものの、1年生は未経験である。彼らを戦力とすべく、上級生は年度当初から、企画書作成と並行してUnityの勉強会を開いた。

「Unity勉強会では、1年生に既存のゲームの改造をしてもらいました。その成果を発表し合い、使ったテクニックを共有してもらいました。こうした実践も経た成果で、1年生も制作の大きな戦力になりました」(竹島)

書類審査の結果、「グラビティ・パラドックス」の制作が決まると、そのほかに使用する道具立ても決まってくる。館や調度品の3Dモデル作成にはBlender⁽⁵⁾。映像提示にはHMDのMeta Quest 3⁽⁶⁾。高い没入感で、体験者が周囲の見回しなどをするにはHMDの利用が適している。チーム制作におけるソースコード等の管理に、GitHub⁽⁷⁾の扱いも習得した。

「GitHubについて、全員に(直接使用しないメンバーも)概要を理解してもらったことが、制作体制を円滑にするのに役立ちました」(山下)

5.1 重力の変化をどう表現するか

「グラビティ・パラドックス」の最大の見せ場は「重力の変化」である。もちろん、落下するビークルや調度品、着地後の体勢の立て直しはHMDからの映像で表現する。だが、それでは視覚と(効果音などを含めても)聴覚への提示にとどまる。IVRCで戦うには不足である。触覚や前庭感覚*1を含めた総合的な演出が、企画書段階から構想されていた。

企画書の提出時には、企画のカテゴリを選択するよう指示されていた。DIY、エンターテインメント、アート、新規事業、社会、技術の六つである。「グラビティ・パラドックス」は、視覚・聴覚に限らない総合的な演出で体験者に楽しんでもらうべく、「エンターテインメント」のカテゴリで応募した。これで審査に通過したのだから、その方針を貫こうというのがチームの一致した意気込みだった。

だが、その「視覚・聴覚以外での重力変化の提示」が難関だった。企画書段階では、脚が曲がったり伸縮したりする椅子を開発して、椅子の傾きで落下の加速度を表現しようとしていた。これの現実的

*1 体の傾き、動き、スピード、重力などを感知する感覚。

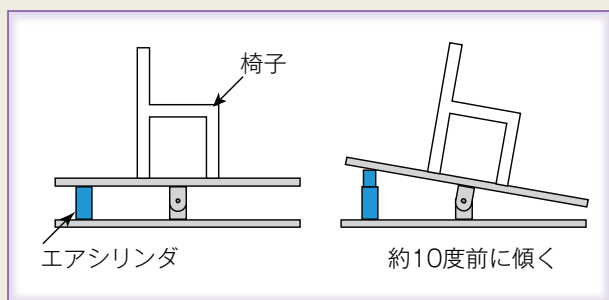


図2 エアシリンダを使った自作モーションベースの仕組み

な実装が思いつかない。書類審査のコメントで「加速度で重力を提示する装置が技術的にチャレンジングである」と指摘されていて、果たしてそれに頭を悩ませることになった。すぐに思い付く方法では、傾けた椅子を元に戻すのに、持ち上げる力が出せない。ロッキングチェアを使うことも検討されたが、これを安定して傾けたり揺らしたりする制御が難しい。傾きを提示できる究極の装置はモーションベース^{*2}だが、これを購入して調達するのは費用の点で無理があった。

「初めの企画書の案を実現しようとするとう無理が出ることに気付きました。どうしてもコンテンツのストーリーに合った仕様にならない。装置自体の規模を大きくしたくはなかったのですが、根本から発想を見直さないといけませんでした」(竹島)

装置規模を気にするのは、装置がシンプルで規模が小さい方が一般的に有利であるからである。展示サイズは2 m 四方に制限されるため、物理的に大きな装置は規定違反となったり展示スペースに余裕がなくなったりする。また、装置が複雑になると、故障が発生しやすくなる。連続3日の稼働を要求されているから、会期中に故障が発生しないようにシンプルに装置を作っておくことに越したことはない。装置が大形化・複雑化するリスクは極力負いたくないものだった。

このように装置の実装の検討が難航している中で、チーム内で気になっていた作品があった。IVRC 2023 総合優勝作品「めい迷路ろ」^{(8)~(9)}(IVRC 2023 LEAP STAGEでの展示の様子の動画は文献(10).)である。これには、手に持った迷路を傾けたとき、自分の体も傾けられる仕掛けが備わって

*2 ステージを、油圧や電動で動かす装置。前後・左右・上下・傾斜・ひねりの自由度の一部または全部の動きを提示できる。最も高性能なものは6自由度の動きを提示できる。

*3 直線運動を発生させるアクチュエータ。

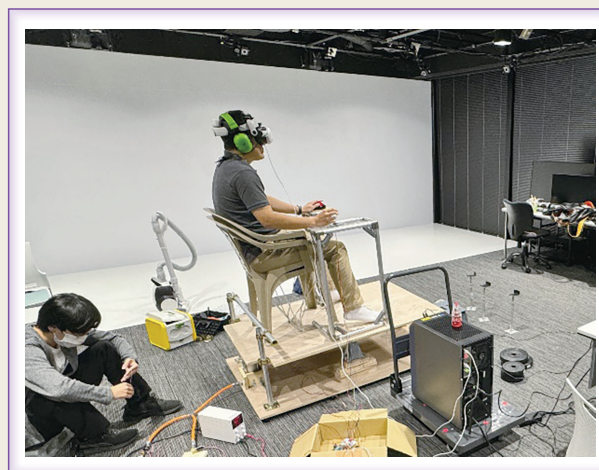


図3 自作した1軸モーションベース

いる。足場をリニアアクチュエータ^{*3}で傾けていた。「グラビティ・パラドックス」では、落下の感覚のためにより大きな傾斜を提示したい。ビークルが進行方向にのみ重力変化ビームを発射できる設定であれば、椅子は前後に傾きさえすればよい。また、シーソーの原理を使えば、支点を他端に置いたときより傾斜角を2倍にできる。かくして、「簡易な1軸モーションベースを自作して、そのステージに椅子を据え付ける」ことにした(図2)。

傾斜の提示機構にはエアシリンダを使った。エアコンプレッサから空気を注入する。大きな力で素早く傾斜させられる機構が安価に実現できた。人が一人であれば、体重に関係なく期待どおりの速さで傾斜を提示したり戻したりできる。かくして、この装置で、前方に約10度の傾きを提示できるようになった。制御には電磁弁を使い、これをArduino マイコン⁽¹¹⁾でコントロールする。システム全体としても、ハードウェア側の制御はArduino マイコンに担わせることにした。Arduino マイコンの扱いは学生実験で経験があったとはいえ、Unityと連携させての複数の機器の制御を習得するのは易しいことではなかった。シーソーの機構も既製の部品が見つからず、キャストを改造して手作りした。かくして手作りモーションベースが完成した(図3)。

「エアシリンダで、大きな力と素早い動作で傾斜が提示できることが分かりました。これで作品が実際に動かせるという確証が持てました」(竹島)

「Arduinoに様々なものを接続していたら動作しなくなりました。そのとき、これは電力不足で、授業に出てきた電源回路が必要なことを思い出して解決できました。思い出せなかったら手詰まりになるところでした」(大谷)

5.2 コンテンツの開発・制作

コンテンツの詳細も固まってきた。洋館の雰囲気やマップ、重力を変化させて突破する仕掛けなどを決め、分担してモデリングした（館の中の映像は図4）。また、統御するプログラムを作成していった。GitHub を使いこなせたおかげで、分担での開発や担当部分を結合させてテストするのも、思った以上にスムーズにできた。仕掛けは「重力を変化させないと通れない廊下」、「重力変化で調度品をぶつけて破壊して進むドア」などを用意した。クライマックスは、階段が張り巡らされ、決まった「下向き」がない、エッシャーの『相対性』さながらの最後の部屋で、丹念にモデリングして制作した（図5）。重

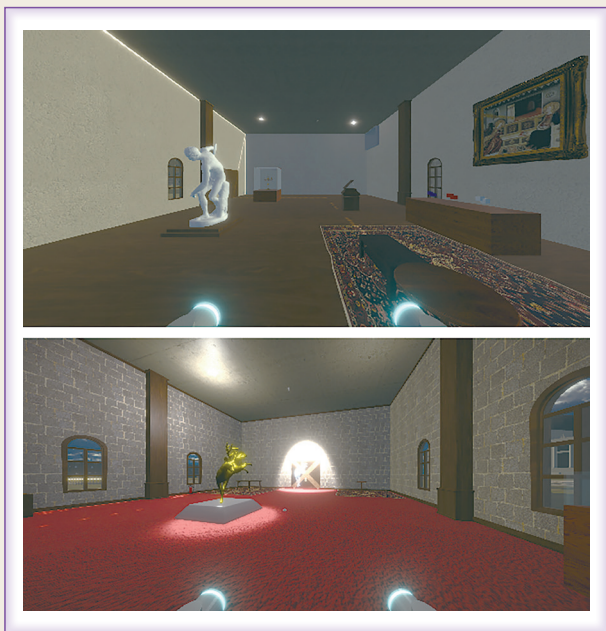


図4 「グラビティ・パラドックス」(SEED STAGE 版)の館の中

力変化の演出も、ビークルが超科学的な乗り物である設定を踏まえて作り込んだ。聴覚の演出も、立体音響を用いて落下音などを作った。

ハードウェアも、傾斜による重力変化提示の仕組みを固めたあと、体験のシナリオに基づいて、あらまほしい演出を洗い出して実装していった。ビークルの移動時には振動があるだろうから、椅子の座面に振動モータを仕込んだ。重力変化のあとビークルも落下していくのだから風を感じるだろう、体験者の顔に風が当たるようファンを取り付けた。移動にはジョイスティック、重量変化ビームの発射に押しボタンスイッチを使うことにした。

「ありきたりの VR コンテンツに見えないよう、またビークルの操縦の雰囲気を出せるよう、HMD 付属のコントローラをあえて操作機器には使いませんでした」（大谷）

こうして「グラビティ・パラドックス」のシステムが徐々に姿を現してきた。SEED STAGE 出場時のシステムの構成は図6である。

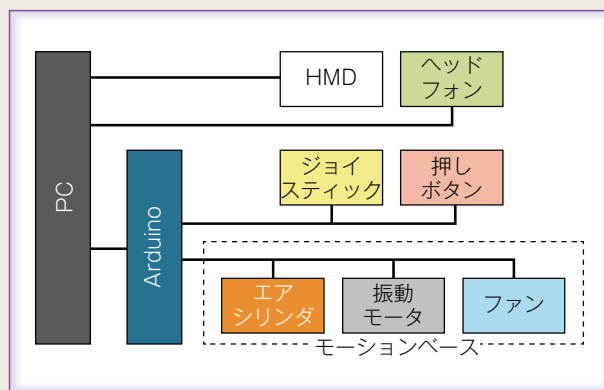


図6 SEED STAGE 時の「グラビティ・パラドックス」のシステム構成



図5 「グラビティ・パラドックス」(SEED STAGE 版) 最終ステージ：エッシャーの『相対性』をモチーフにしている



図7 SEED STAGE 展示の様子。審査員が体験中

5.3 体験の質のブラッシュアップ

—体験者のために—

「エンターテインメント」を標ぼうして書類審査を通過した IVRC チームにとって、体験者に楽しんでもらうことも重要な課題であった。限られた時間の中で、操作を把握してもらい、仕掛けを解き、脱出するまでをスムーズに体験してもらうために、導線の作り方、バランスの調整、インタフェースの設計などにも多くの時間を費やした。

「1 回の体験時間は 3 分以内と指示されています。その中で導線から外れにくく、それでいて密度の高い体験になるよう、マップや仕掛けは何度も修正を重ねました」(竹島)

また、会場での案内や誘導も入念に考えた。待つでも体験したいと思ってもらえるような対応、待ち時間を少なくする手際良いオペレーションもチームで打ち合わせた。

「気持ち良く体験して頂くことが重要なので、案内や誘導の手順書も作りました。手順書は改良を重ねて本番に臨みました。メンバーで案内の練習もしました」(竹島)

調整を出発前日まで続けた。そして IVRC SEED STAGE に臨んだ。

6. SEED STAGE

SEED STAGE は、9 月 11～13 日に名古屋・名城大で開催された。日本バーチャリアリティ学会大会⁽¹²⁾と併催である。VR 関連の研究者が集まる中での実機展示である。

設営・調整は、事前の練習が奏功して、スムーズに行えた。まず、審査コアタイムである。審査員が



図8 SEED STAGE を終えた IVRC チーム。LEAP STAGE 進出を果たし、SEED 観客賞を受賞した

次々訪れる中、チームメンバーは制作の意図が伝わるように願って、また、楽しんでもらって印象に残るように、あるいは固唾をのんで審査員の体験を見守った(図7)。

審査コアタイムが終わると、学会の参加者が体験にやってくる。練習どおりにスムーズに案内できた。多くの体験者が、手製のモーションベースが傾斜を提示したときに「あつ」と驚きの声を上げるのを聞いて、チームメンバーは頬が緩んだ。体験者は、高く評価する作品をフォームから投票できるようになっていた。体験を終えた人たちに、投票してもらえている気配があった。

3 日間で体験者は延べおよそ 160 人。想定を超えた多くの人に体験してもらえた。一度のトラブルもなく、3 日間装置は稼動し続けた。(展示の様子の動画は文献(13).)

審査結果の発表。LEAP STAGE に進出する 10 件の作品の中に、「グラビティ・パラドックス」の名前があった。悲願の SEED STAGE 突破。更に、参加者による高評価投票数は 21 件の作品中最多、SEED 観客賞を受賞した(図8)。

「昨年度の出展時に比べて、会場で大きな手応えを感じました。これが LEAP STAGE 進出と観客賞受賞として形になったのはうれしい限りです」(山下)

7. SEED STAGE突破, LEAP STAGEへ

LEAP STAGE は 10 月 26～27 日に、東京・テレコムセンターで「サイエンスアゴラ 2024」⁽¹⁴⁾の一部として開催される。それまでの間、1 か月強、例

年、その期間で大幅なグレードアップを経て高評価を獲得する作品も少なくない。すなわち、全てのチームが、LEAP STAGE に向けて改良を続けなくてはならない。

SEED STAGE で多くの人に体験してもらう中で、気付いた点、至らなかった点も見えてきた。開発側からは見えていなかったコメントをもらい、はっ

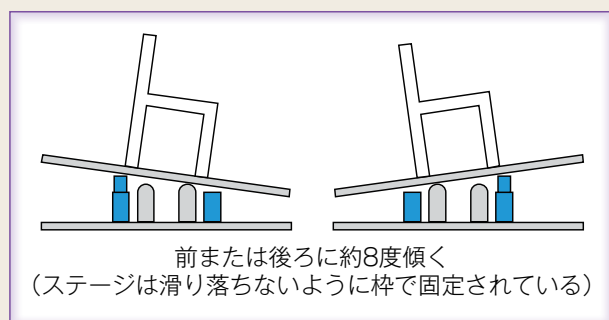


図9 エアシリンダを増設し、前後に傾けられるようにしたモーションベースの仕組み



図10 改良した手作りモーションベース。前・後ろ両方の傾斜を提示できるようになった

とすることもしばしばだった。

「自分たちなりに作り込んだつもりでも、演出、特に視覚以外のものが物足りなかったと感じた人が結構いたようでした。これは LEAP STAGE までに更に作り込まないと、と感じました」(竹島)

7.1 モーションベース大改修

手製のモーションベースの効果は良好であったものの、物足りなそうな参加者もいた。というのは、重力変化の際に必ず「前に傾く」からで、複数回体験すると慣れて、意外性を失ってしまうのである。これには、モーションベースを「ほぼ作り直す」ことになった。エアシリンダを前後1本ずつ、計2本に増設し、前にも後ろにも傾斜できるようにした(図9, 10)。これに対応して、館のマップや仕掛けも全面改修した(図11)。SEED STAGE では、重力の変化は任意のタイミングにボタン操作で行えた。これを、マップ内に「重力変化スポット」を用意し、ビークルがそこに来ると重力変化機能が発動するように変更した。このとき、重力は前が「下」になるのか、後ろが「下」になるのか、前もって分からない。これで意外性を演出することにした。また、この変更は、重力を変化させられる場面で自由度の高さから、導線を外れてしまう体験者がいたことへの対応でもある。後ろが「下」になるように重力変化することで解ける仕掛けも用意した。

「エアシリンダを2本にするのは装置規模が倍になるということです。短い期間で装置の複雑度を倍にするのは時間との戦いでした」(山下)



図11 「グラビティ・パラドックス」(LEAP STAGE 版)の館の映像。SEED STAGE 版から仕掛けとともに刷新した

この改修は、単に部品をもう1組加える以上の仕事だった。図9のように、前後のどちらに傾くかによってステージの支点が異なるようにして傾斜角を稼ぐように設計を変更している。2本のエアシリンダの連携制御も新たに作った。ステージが滑り落ちないように枠に固定する工夫など、モーションベースをもう1台製作するよりも多い作業量だった。予想以上に、この1か月強の制作は時間に追われることになった。

7.2 より楽しんでもらうために

一般の来場者も多数あると予想されるサイエンスアゴラでは、より楽しんでもらうこと、よりスムーズにブースを運営することが重要であると考えた。先述の導線の確保もそうである。演出も改良・増強した。例えば、落下の感覚を表現するファンは風量不足であったため、出力の大きいブロワを採用した。楽しみやすさに対しては、音声ガイドも追加した。

また、サイエンスアゴラでは、子供の来場者も多い。子供は、健康への影響の理由から、HMDの装着が推奨されない。せっかく来てくれた子供にも体験してもらうために、HMDの表示内容を分岐させ、ブース内のプロジェクタに表示させることにした。HMDほどの没入感は得られないものの、子供にも(HMDの影響を懸念する保護者にも)安心して楽しんでもらえるようにした。これは、体験内容をブース外で見ている、待っている人たちにも見てもらえる方策にもなった。

LEAP STAGE への準備も、前日まで続いた。後期の授業も開始された中、可能な限りの時間を捻出して取り組んだ。短い期間でできるだけの労力を注ぎ、お台場(江東区青海)へ赴いた。

「LEAP STAGE までの期間は、大学に朝の開門と同時に行っていました。思い返せばあの期間は作品制作をしているか授業を受けているかという生活でした」(山下)

8. LEAP STAGE

LEAP STAGE の設営も、装置の大規模な変更があったものの円滑に行えた。審査員と来場者を待たばかりになった。周囲を見ると、どのチームもSEED STAGE から一回りも二回りも、作品を改良・洗練させている。緊張が走った。奮い立った。ま



図12 LEAP STAGE 展示の様子。多くの方に体験してもらえた

ず、審査コアタイム。その後、一般の来場者の体験時間となった。

LEAP STAGE でも装置は滞りなく、トラブルなく稼動し、2日間で約170人の来場者に体験してもらえた。ブースの運営は、SEED STAGE よりはるかにスムーズだった。たくさんの方に、IVRCチームが考える「エンターテインメント」を披露できた。(図12、展示の様子の動画は文献(15).)

そして表彰式。総合優勝は岐阜大チームの「中継を止めるな! ~究極のフォーミュラレース中継体験~」であった^{(16)~(17)}(展示の様子の動画は文献(18)). 各賞も発表されていく。しかし、「グラビティ・パラドックス」の名が呼ばれることはなかった。VRプロジェクトの来年度の目標が、「LEAP STAGE で入賞すること」になった瞬間であった(図13)。

「各賞は逃しましたが、ここまで全力で取り組めたことに大きな達成感を覚えています。来年も挑戦します」(竹島)



図 13 LEAP STAGE を終えた IVRC チーム。悲願の LEAP STAGE 出場を果たし、次年度は受賞を狙う

9. LEAP STAGEを終えて

「グラビティ・パラドックス」は、IVRC 審査での各賞は逃したものの、たくさんの人に楽しんでもらえた、というのが IVRC チームの自負である。

「一番長いときで 30 分待ちの列ができていました。こんなに待ってでも体験したい人がいるものを作れたのだ、と誇らしく思います」(大谷)

「印象的だったのは、1 日目に体験した方が『明日は娘を連れてくる』と言って、実際、翌日に娘さんと一緒に体験しに来てくれたことでした。ほかの人にも体験させたい作品であったということは、大変な賞賛です」(竹島)

制作した作品は、今後も、学内外イベントで展示する予定とのことで、読者諸氏におかれても、展示の機会に体験して頂きたい。

制作した作品には、様々な工夫と可能性が詰まっている。作品の制作から得た経験は、チームメンバーの今後の制作活動、または将来の研究活動に役立つことは疑いない。

10. むすび

本稿では、工学院大学 VR プロジェクトによる IVRC 2024 出場を追った、筆者が取材し、IVRC

チームの話を聞いて感じたのは、その制作に懸ける熱意である。そして、そのための技術を自分のものにしようとする貪欲さである。また、チームが 1～3 年生で構成されているのにも、筆者は感心した。彼らは卒業論文や修士論文で立派な研究をし、社会に出たら熱意あるエンジニアとして活躍していくのだろう。

本稿が読者諸氏に届く頃には、IVRC 2025 の制作も大詰めである。工学院大学 VR プロジェクトの活躍に御期待頂きたいと思うと同時に、勤務校等で IVRC に出場する団体を知ることがあったら、本稿での険しい道のりを思い出し、応援して頂きたい。

文献

(サイトの検索日は 2025 年 1 月 1 日)

- (1) <https://ivrc.net/>
- (2) <https://vrsj.org/>
- (3) [https://mcescher.com/gallery/lithograph/#iLightbox\[gallery_image_1\]/66](https://mcescher.com/gallery/lithograph/#iLightbox[gallery_image_1]/66)
- (4) <https://unity.com/>
- (5) <https://www.blender.org/>
- (6) <https://www.meta.com/jp/quest/quest-3/>
- (7) <https://github.com/>
- (8) 森田尚樹, 船引應佑, 竹内大弥, 坂野将大, 佐々木翔哉, 西川 凌, 森寄隼一郎, “めい迷路ろ,” 第 28 回 VR 学会大会, IVRC-08, Sept. 2023.
- (9) <https://ivrc.net/2023/release3/>
- (10) <https://www.youtube.com/watch?v=IGtLGGzDYPY>
- (11) <https://www.arduino.cc/>
- (12) <https://conference.vrsj.org/ac2024/>
- (13) <https://www.youtube.com/watch?v=26mvcTA1F40>
- (14) <https://www.jst.go.jp/sis/scienceagora/2024/>
- (15) <https://www.youtube.com/watch?v=Dsmx9TqNm9M>
- (16) 阪井啓紀, 小木曾直輝, 野倉大輝, “中継 (カメラ) を止めるな! ～究極のフォーミュラレース中継体験～,” 第 29 回 VR 学会大会, IVRC-17, Sept. 2024.
- (17) <https://ivrc.net/2024/release3/>
- (18) https://www.youtube.com/watch?v=z_rlbDcy-I0

牛田啓太 (正員)

2000 東大・工・電子情報卒。2005 同大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻博士課程了。群馬高専・電子情報・講師を経て、現在、工学院大・情報・情報通信・准教授。博士 (情報理工学)。





GPU を利用した PyTorch 入門

山梨大学

レオ チー シャン

Chee Siang Leow

西崎博光

Hiromitsu Nishizaki

1 はじめに

近年、画像認識や自然言語処理などの分野で深層学習（ディープラーニング）技術が発展している。深層ニューラルネットワーク（DNN: Deep Neural Network）は、膨大なデータから特徴パターンを学習し、高いデータ分析能力を持つモデルを構築できるため、実世界の課題解決において重要な役割を果たしている。

深層学習モデルには数百万から数億もの学習可能なパラメータが含まれており学習プロセスによって最適化されるが、それには膨大な計算量が必要となる。また、より良いモデルを得るためには、幾通りもの学習プロセスを繰り返し実行する必要がある。モデルの学習には膨大な時間を要する。そこで、並列計算に優れた GPU（Graphics Processing Unit）がモデル学習には必須となっている。GPU は多数の計算コアを搭載しており、大量の行列・ベクトル演算を同時に実行できるため、深層学習モデルの学習速度を飛躍的に向上させることができる。

本稿では、深層学習モデルを学習する際に Python 言語で用いる「PyTorch」という深層学習フレームワークと、PyTorchでの GPU の利用方法を紹介する。PyTorch は産業界で広く採用されており、特に OpenAI や Tesla といった大手テクノロジー企業で積極的に活用されている。OpenAI は、2020 年に深層学習フレームワークを PyTorch に標準化したことを発表した。Tesla では、自動運転技術の開発において PyTorch を使用し、車線検出・歩行者追跡・信号認識などのタスクを処理している。

深層学習は、もはや一般的な技術となり様々な情報が世にあふれているため、深層学習そのものについてはほかの情報を参照されたい。本稿では視点を少し変え、単なる PyTorch の紹介とせず、学習時間を短縮し効率よくモデルを学習するために、GPU を活用したモデル学

習方法やその効果について解説する。具体的なコード例を交えながら、初心者にも理解しやすい形で説明し、GPU がどのように深層学習モデルの学習と最適化に役立つかを説明する。この内容が読者にとって深層学習への第一歩となることを願う。

2 深層学習とは

PyTorch フレームワークを紹介する前に、まず、簡単に深層学習について説明する。

深層学習は、人間の脳の神経細胞（ニューロン）の働きを模倣した人工ニューラルネットワークを多層に重ねた構造を持つ機械学習手法である。従来の機械学習手法では、入力データに対する特徴量の設計や選択を人間が手動で行う必要があったが、深層学習では大量のデータから自動的に特徴を学習することができる点が大きな特徴である。

2.1 ニューラルネットワークの基本構造

図 1 に示すように、深層学習の中心となる DNN は、一般的に入力層、隠れ層、出力層という主要な層で構成されている。それぞれの層には複数のノード（円で表示）があり、層と層の間はエッジ（線）で接続されている。層と層の間にあるエッジは実数 w を持ち、DNN の計算に使われる。このエッジの値は「パラメータ」（重み）と呼ばれ、学習プロセスでこれを最適化する。

入力層では画像などのデータを数値に変換して受け取り、隠れ層ではそのデータの特徴を抽出し、出力層では「この画像は犬」などの判別結果を出力する。「深層」とは、この隠れ層が複数存在することを指し、層が多いほど DNN がより複雑なパターンを学習できるようになる。一方で、層が増え DNN が大きくなるほどノードとエッジの数が増加し、それに伴ってパラメータも増加するため計算に多くの時間を要するようになる。

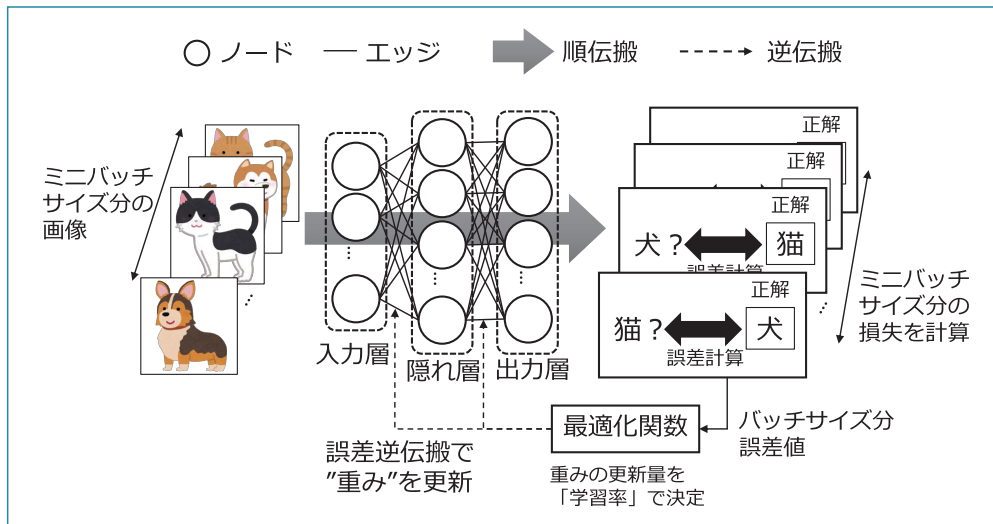


図1 深層ニューラルネットワーク (DNN)

2.2 深層学習モデルの学習プロセス

深層学習モデルの学習プロセスは、学習データの入力から始まる。複数の学習データ（図1では犬や猫の複数枚の画像）を一つにまとめたもの（これを「ミニバッチ」と言う。）を、DNNに入力することで、効率的に学習を進めることができる。

入力されたデータは、入力層から隠れ層を通り出力層へと計算が進められる。この計算の流れを順伝搬（あるいはフォワードパス）と呼ぶ。DNNが出力した結果（「犬?」「猫?」など）と正解（「犬」）を比較し、正解との差を誤差として計算する。例えば、猫の画像を「犬」と予測した場合は大きな誤差が生じる。この計算された誤差を出力層から入力層に向かって「逆向き」に伝搬させ、各接続のエッジが持つパラメータの値を、最適化関数と「学習率」と呼ばれるハイパーパラメータ（学習率やバッチサイズなどの学習アルゴリズムの挙動を制御するパラメータ）で調整する。この処理を「誤差逆伝搬」と呼ぶ。このパラメータ調整により、次に同じような画像が入力された際は、より正確な判別ができるようになる。この一連のプロセスを大量のデータで繰り返しパラメータを更新していく処理を「学習」と言う。学習が進むにつれて入力に対する出力が正しくなり、人間が学びによって賢くなっていくことに類似している。

3 ハードウェアの進化と GPU の役割

深層学習では、膨大な数のノードとエッジから成るDNNを、大量のデータで効率良く学習させることが重要である。例えば、犬と猫を判別するDNNを学習するためには、数万枚から数千万枚以上の画像を繰り返し処理する必要がある。更に、認識精度を向上させるために

DNNの層を深くしたり、ノード数を増やしたりすると、必要な計算量は飛躍的に増加し、学習が終わるまでに多くの時間を要す。これは深層学習の大きな課題である。

CPUは、複雑な処理を少数のコアで逐次的に実行する設計となっており、大量のデータを効率良く計算するには不向きである。そこで登場するのがGPUである。GPUは数千から数万の小さな計算コアを持ち、単純な計算を同時に並列処理できる設計となっている。GPUのアーキテクチャは、DNNの計算の大部分を占める行列演算に非常に適しており、CPUと比較して数十倍から数百倍の速度で計算を実行できるため、DNNの学習時間を大幅に短縮できる。

深層学習モデルの開発者がより簡単にGPUを利用できるように設計されたのが、PyTorch等の深層学習フレームワークである。これらのフレームワークを用いると、抽象化されたコードを書くだけでDNNの順伝搬計算や誤差逆伝搬計算を自動的にGPU上で実行できるようになる。開発者は煩雑なGPUプログラミングを意識せずに、深層学習モデルの設計と学習に集中することができる。

4 深層学習に関わるソフトウェア

深層学習に関わるソフトウェアを図2に示す。この図は深層学習を中心としたGPUコンピューティング環境を階層構造で示したものである。

最下層のハードウェアにはCPUとGPUがあり、その上でUbuntuやRed Hat、WindowsなどのOSプラットフォームが動作する。

更に、CUDAドライバ層ではメモリ管理やWindows/Graphics機能、共通ライブラリなどの基盤機能を提供し、その上のCUDAツールキットにはnvccなどのコ

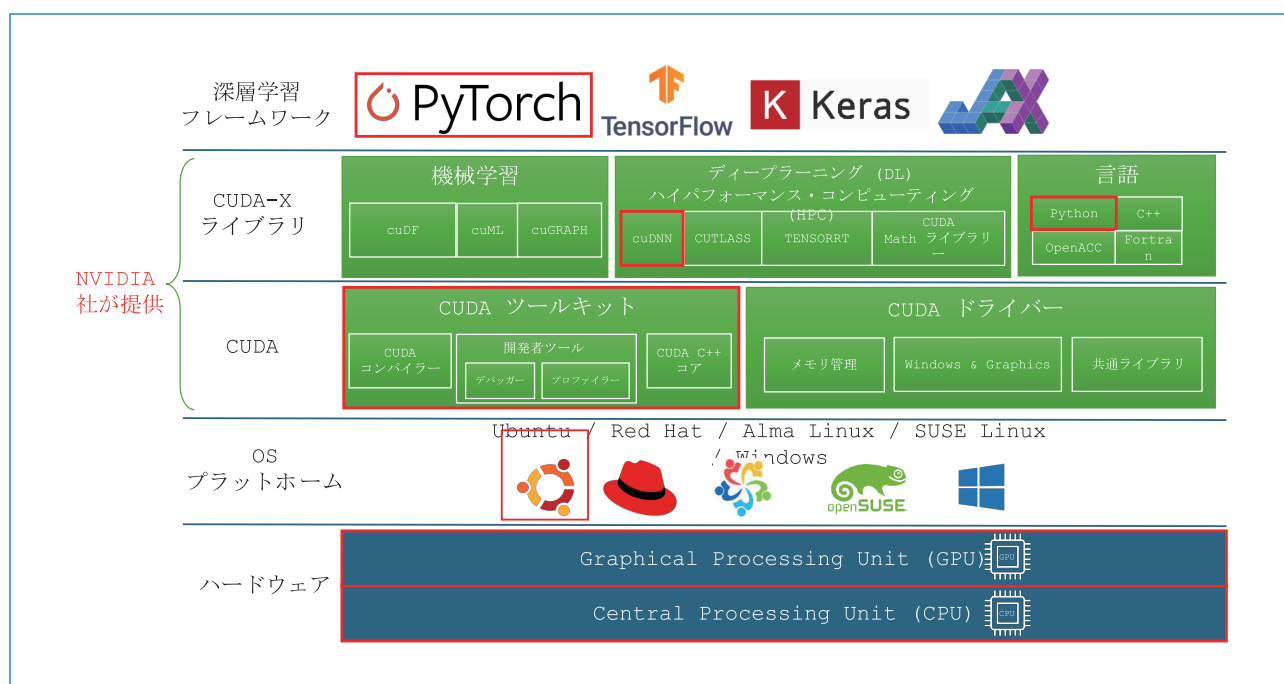


図2 深層学習に関わるソフトウェア

ンパイラやデバッガ、プロファイラといった開発ツール、及びCUDA C++ コアライブラリが開発者に提供されている。

続いて、CUDA C++ コアライブラリによって開発されたCUDA-Xライブラリは機械学習向けのcuDF、cuML、cuGRAPHや、深層学習やハイパフォーマンスコンピューティング向けのcuDNN、CUTLASS、TensorRT、CUDA Math Libraryなどが提供されている。

また、それらを利用するためのプログラミング言語としてPythonやC++、OpenACC、Fortranなどが利用可能である。

最上層には、PyTorchやTensorFlow、Keras、Jaxといった深層学習フレームワークが位置し、これらはCUDAを活用してGPU上で効率的に学習や推論を行うことができる。このようにNVIDIA社が提供している開発環境が現在の深層学習技術の基盤となっている。本稿では、図2の赤枠で囲っている部分について解説する。

4.1 CUDAとは

CUDA (Compute Unified Device Architecture) は、NVIDIA社が2007年に開発したGPUコンピューティングのためのプラットフォーム及びプログラミングモデルである⁽¹⁾。従来、GPUは主に3Dグラフィックスの描画処理に特化していたが、CUDAの登場によりGPUを汎用的な並列計算に活用することが可能となった。これはGPGPU (General Purpose computing on GPU, GPUによる汎用計算) と呼ばれ、深層学習だけ

でなく、シミュレーション、金融工学、医療画像処理など多様な分野で利用されている。

CUDAの基本的な仕組みは、プログラムの一部（特に並列化に適した計算部分）をGPU上で実行するというものである。具体的には、CUDAの開発者はC/C++言語をベースにしたCUDA C/C++を使用し、「カーネル」と呼ばれる関数を記述する。このカーネルはGPU上の数千のスレッドで並列に実行され、大量のデータを同時に処理することができる。例えば、行列の加算や乗算などの演算は、各要素を独立して計算できるため、GPUの並列処理能力を最大限に生かすことができる。

深層学習においては、ニューラルネットワークの前向き計算（順伝搬）や勾配計算（誤差逆伝搬）に含まれる大量の行列演算がCUDAによって高速化される。実際に、現代の深層学習の発展は、CUDAによってGPUの計算能力を有効活用できるようになったことが大きな要因の一つである。

4.2 cuDNNと深層学習ライブラリ

NVIDIA社は、CUDAの上位レイヤとしてcuDNN (CUDA Deep Neural Network library) という深層学習専用のライブラリを提供している。cuDNNは、DNNを構築するために必要な層、活性化関数、正規化層などといった、DNNの学習で頻繁に使用される操作に対して高度に最適化された実装を提供している。これにより、開発者は更に低レベルの最適化を意識することなく、効率的な深層学習計算を行うことができる。

PyTorchなどの深層学習フレームワークは、内部で

CUDA と cuDNN を利用して計算を高速化している。開発者は Python などの高級言語でコードを書くだけで、自動的に GPU 上での計算が行われる仕組みとなっている。

更に、NVIDIA 社の CUDA Toolkit には、CUDA コンパイラ、デバグガ、プロファイラなどの開発ツールだけでなく、行列計算を高速化する cuBLAS、高速フーリエ変換を行う cuFFT など、様々な科学技術計算向けのライブラリも含まれている。これらは総称して「CUDA-X ライブラリ」と呼ばれ、多様な計算ニーズに対応している。

近年では、GPU に「Tensor Core」と呼ばれる専用の演算ユニットが搭載され、Float16（16 ビット浮動小数点数）や Integer8（8 ビット整数）などの低精度での高速演算や省電力計算が可能となっており、これにより学習速度が更に向上している。GPU を利用することで、従来の CPU のみを用いた場合と比べ、数倍から数百倍の計算高速化が実現され、これにより、深層学習を用いた実験の反復回数が飛躍的に増加し、ハイパーパラメータのチューニングや大規模データの扱いが現実的な時間内に行えるようになった。

4.3 深層学習フレームワーク PyTorch

PyTorch は、Facebook（現 Meta 社）の AI Research 部門によって開発された深層学習フレームワークであり、直感的な操作性と柔軟性の高さから、特に研究分野で広く採用されている。PyTorch の最大の特徴は、Python という親しみやすいプログラミング言語を使って DNN を構築できる点と、実行時に計算の流れを動的に変更できる「動的計算グラフ」と呼ばれる仕組みにある。

PyTorch の内部アーキテクチャは、CUDA と cuDNN との密接な連携によって成り立っている。PyTorch は表面上 Python のインタフェースを提供しているが、実際の計算処理は C++ と CUDA で実装された効率的なバックエンドによって行われている。開発者が PyTorch で DNN の演算を記述すると、それらは自動的に CUDA のカーネル関数に変換され、GPU で並列実行される。また、畳込み層やプーリング層などの一般的な DNN の操作は、cuDNN の最適化されたアルゴリズムを使用して処理される。

このアーキテクチャにより、GPU プログラミングやメモリ管理といった低レベルの詳細を意識することなく、高速な深層学習の計算を行うことができる。例えば、モデルやデータを GPU に転送するためには単に `to('cuda')` というメソッドを呼び出すだけでよく、後は PyTorch が自動的に GPU 上で最適化された

計算を実行する。

また、PyTorch は学習済みモデルの保存と読み込み、分散学習のサポート、多様なデータ型（Float16 など）のサポートなど、実践的な深層学習に必要な機能も備えている。これにより、研究者や開発者は、アイデアの実装からプロトタイピング、そして本番環境への展開まで、深層学習の全ワークフローを PyTorch の枠組みの中で効率的に行うことができる。

4.4 深層学習フレームワークの利点

深層学習の開発において、直接 CUDA や cuDNN を用いて GPU プログラミングを行う方法もあるが、これには並列計算やメモリ管理など複雑な C++ プログラミングの知識が必要となる。このような専門的知識の障壁を低くし、より多くの研究者や開発者が深層学習を活用できるようにするため、PyTorch や TensorFlow などの深層学習フレームワークが開発された。

本稿で扱う PyTorch は、このような深層学習フレームワークの一つであり、複雑な GPU プログラミングを意識することなく、Python という高級言語のみで DNN を記述し、GPU の恩恵を受けることができる。PyTorch が提供する直感的なインタフェースにより、研究者はモデルのアイデアを素早く実装し、実験することが可能となった。

例えば、従来、数千行のコードを必要とした畳込みニューラルネットワークの実装も、PyTorch では数十行で記述することができる。また、モデルの GPU への転送も数行のコードで完了し、自動的に計算が高速化される。このような抽象化レベルの向上により、プログラミングの専門家でなくても、様々な分野の研究者が自身の専門知識を生かして深層学習を応用することが可能となった。これにより、深層学習の研究サイクルが大幅に短縮され、イノベーションの速度が加速している。

PyTorch などの深層学習フレームワークは、GPU の計算能力を最大限に引き出しつつ、開発の複雑さを大幅に削減し、深層学習技術の普及と発展を支えている。本稿では、この PyTorch を用いた単一 GPU 計算の基礎から複数 GPU 計算の応用までを解説していく。まずは、読者自身の開発環境における GPU の性能や CUDA のバージョンを確認し、最新のドライバやライブラリを使用することが、学習効率を大幅に向上させる重要なポイントであることを理解する必要がある。

次章から CUDA や CuDNN、PyTorch などの具体的なインストール方法や利用方法について詳しく解説していく。

5 深層学習環境の構築

「百聞は一見に如かず」ということわざがあるように、深層学習を学ぶ場合にも、実際に手を動かしてみることが最も効果的な学習方法である。PyTorch を使用して GPU で深層学習を行うための環境を整えることは、初心者にとって最初の重要なステップである。本章では、Python の仮想環境の構築から NVIDIA ドライバの更新、CUDA と cuDNN の設定、そして PyTorch のインストールまでを、順を追って解説する。環境構築には多少の手間がかかるが、一度正しく設定してしまえば、モデルの学習時間が大幅に短縮され、複雑な実験も迅速に行えるようになる。これにより、アイデアの検証サイクルが速くなり、深層学習の研究開発が飛躍的に加速するだろう。公式ドキュメントだけでは分かりにくい部分も、本章で解説する手順に従えば、初心者でも確実に GPU を活用した PyTorch 環境を構築することができる。

5.1 CUDA/CuDNN の設定

本章では、Ubuntu 24.04.2 環境において CUDA Toolkit 12.4 及び cuDNN をインストールし、正しく設定する手順を説明する。

5.2 NVIDIA ドライバのインストール

まず、CUDA を利用するには、NVIDIA の GPU ドライバが適切にインストールされている必要がある。以下のコマンドを実行して、NVIDIA の公式ドライバをインストールする。

```
$ sudo ubuntu-drivers autoinstall
```

このコマンドにより、システムに最適な NVIDIA ドライバが自動的にインストールされる。インストールが完了したら、システム (OS) を再起動する必要がある。

```
$ sudo reboot
```

再起動後、次のコマンドを実行して、NVIDIA ドライバが正しくインストールされているかを確認する。

```
$ nvidia-smi
```

このコマンドを実行すると、搭載されている GPU の使用状況やインストールされているドライバのバージョンが表示される。

5.3 CUDA Toolkit 12.4 のインストール

次に、CUDA Toolkit 12.4 をインストールする。CUDA Toolkit には、CUDA を利用するための開発ツ

ールやライブラリが含まれている。以下の手順に従いインストールする。

1. まず、CUDA リポジトリの優先設定ファイルをダウンロードし、システムに適用する。

```
$ wget
https://developer.download.nvidia.com/compute/cuda/
repos/ubuntu2204/x86_64/cuda-ubuntu2204.pin
$ sudo mv cuda-ubuntu2204.pin /etc/apt/preferences.d/
cuda-repository-pin-600
```

2. 次に、CUDA Toolkit 12.4 のローカルインストーラ用パッケージをダウンロードする。

```
$ wget
https://developer.download.nvidia.com/compute/cuda/
12.4.0/local_installers/cuda-repo-ubuntu2204-12-4-
local_12.4.0-550.54.14-1_amd64.deb
```

3. ダウンロードしたパッケージをインストールする。

```
$ sudo dpkg -i cuda-repo-ubuntu2204-12-4-local_12.4.0-
550.54.14-1_amd64.deb
```

4. CUDA の GPG キーを適切な場所にコピーする。

```
$ sudo cp /var/cuda-repo-ubuntu2204-12-4-local/cuda-*-
keyring.gpg /usr/share/keyrings/
```

5. パッケージリストを最新の状態に更新する。

```
$ sudo apt-get update
```

6. CUDA Toolkit 12.4 をインストールする。

```
$ sudo apt-get -y install cuda-toolkit-12-4
```

そのほかの CUDA バージョンは CUDA の Archive サイト⁽²⁾を参照することができる。インストールが完了したら、CUDA が正しく動作するように環境変数を設定する必要がある。

5.4 環境変数の設定

CUDA を利用するために、環境変数を設定する。環境変数とは、システムがプログラムの動作に必要な情報を保持する仕組みである。以下のコマンドを実行して、CUDA のパスをシェルの設定ファイル (.bashrc) に追加する。

```
# 一度しか実行しないコマンド
$ echo 'export PATH=/usr/local/cuda-12.4/bin:$PATH' >>
~/.bashrc
$ echo 'export LD_LIBRARY_PATH=/usr/local/cuda-
```

```
12.4/lib64:$LD_LIBRARY_PATH' >> ~/.bashrc
# これらのコマンドを実行しておけばターミナル起動
時に自動で ~/.bashrc がロードされる
$ source ~/.bashrc
```

これにより必要な環境変数の設定がなされ、CUDA 関連のプログラムやライブラリがシステム上で正しく認識されるようになる。

5.5 cuDNN のインストール

cuDNN は、深層学習向けに最適化された NVIDIA 製のライブラリである。CUDA と組み合わせて使うことで、DNN の処理速度を大幅に向上させることができる。

以下の手順で cuDNN をインストールする。

```
$ wget https://developer.download.nvidia.com/compute/
cudnn/9.7.1/local_installers/cudnn-local-repo-
ubuntu2204-9.7.1_1.0-1_amd64.deb
$ sudo dpkg -i cudnn-local-repo-ubuntu2204-9.7.1_1.0-1_
amd64.deb
$ sudo cp /var/cudnn-local-repo-ubuntu2204-9.7.1/cudnn-*-
keyring.gpg /usr/share/keyrings/
$ sudo apt-get update
$ sudo apt-get -y install cudnn-cuda-12
```

5.6 インストールの確認

最後に、CUDA と cuDNN が正しくインストールされているかを次のコマンドで確認する。

1. CUDA のバージョンの確認

```
$ nvcc --version
```

このコマンドを実行すると、CUDA コンパイラのバージョン情報が表示される。

2. cuDNN のバージョンの確認

```
$ cat /usr/include/cudnn_version.h grep CUDNN_MAJOR -
A 2
```

インストールされている cuDNN のバージョンが表示される

以上で、Ubuntu 24.04.2 における CUDA Toolkit 12.4 と cuDNN の設定が完了となる。これで GPU を活用した高速な深層学習が可能となる。

6 深層学習に関わるソフトウェア

本章では、PyTorch を利用するための環境構築につ

いて詳述する。まずは Python 環境の準備と仮想環境の作成、次に GPU を有効にするために必要な NVIDIA の CUDA 及び cuDNN について、その概要と役割、設定方法、更に pip (Python のパッケージ管理ツール) を利用した PyTorch のインストール方法について解説する。

まず、PyTorch は Python3 系 (推奨は ver.3.10 以上) で動作する。Python のライブラリの依存関係の衝突を避けるため、まずは仮想環境を作成する。例えば、Python 標準の venv を利用する場合は、以下のコマンドを実行する。

```
$ sudo apt-get install python3.10-venv
$ python -m venv pytorch-env
$ source pytorch-env/bin/activate
```

このように仮想環境を構築することで、PyTorch 及び関連ライブラリをほかの環境と分離して管理できる。

繰り返しとなるが、深層学習においては並列計算能力が非常に重要である。CUDA Toolkit には、cuBLAS や cuFFT などのライブラリが含まれており、更に深層学習向けのライブラリとして cuDNN が提供されている。cuDNN は、畳込みニューラルネットワークなどの演算処理を最適化し、GPU 上での計算を更に高速化するために不可欠なコンポーネントである。

通常、PyTorch の CUDA 対応版はこれらのライブラリを同梱しており、ユーザが個別に CUDA Toolkit や cuDNN をインストールする必要はないが、5.1 で説明したように、深層学習を行う開発環境には最新の GPU ドライバがインストールされている必要がある。GPU ドライバを NVIDIA の公式サイトから入手し、必ず最新の安定版にアップデートしておく必要がある。

次に、pip を使って PyTorch をインストールする手順を示す。PyTorch 公式サイト (<https://pytorch.org>) では、OS、パッケージ管理ツール (pip)、及びコンピュータプラットフォーム (CUDA のバージョン) を選択するインタフェース (<https://pytorch.org/get-started/locally/>) が用意されている。例えば、Linux 環境で CUDA Toolkit 12.4 対応の PyTorch を pip でインストールする場合、公式サイト上で次のようなコマンドが表示される。

```
$ pip install torch torchvision torchaudio
```

このコマンドにより、常に最新の CUDA のバージョンに合わせた (本稿の時点では CUDA Toolkit 12.4) PyTorch と関連パッケージ (torchvision, torchaudio) をインストールできる。Windows の場合も同様に、OS と CUDA バージョンに応じたコマンドが表示される。

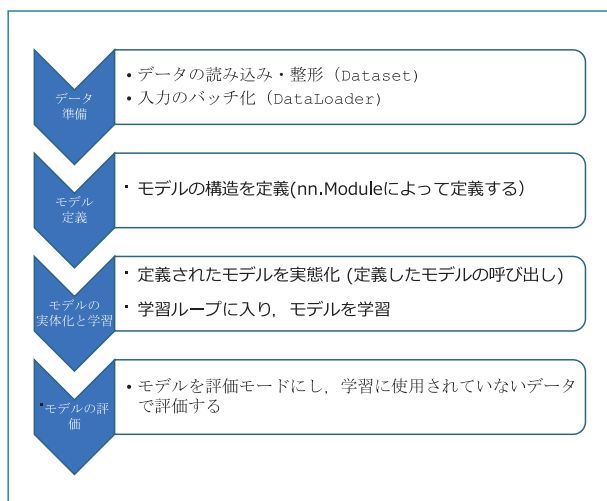


図3 深層学習における学習ループ

特定のバージョンをインストールしたい場合は、バージョン番号を明示指定する方法もある。例えば、PyTorch-2.6.0 の CUDA Toolkit 11.8 対応版をインストールする場合は次のようになる：

```
$ pip install torch torchvision torchaudio --index-url
https://download.pytorch.org/whl/cu118
```

このように、'cuXXX' の --index-url とともにインストールすることで、対応する CUDA バージョンの PyTorch を導入できる。これらは必要に応じて、Pytorch の公式サイト（<https://pytorch.org/get-started/previous-versions/>）からバージョンに合わせたコマンドをコピーし、インストールすることができる。

インストール後は、Python シェルで以下のコードを実行する。正しくインストールが行われ GPU が利用可能かどうかを確認する。

```
$ python3 -c "import torch; print(torch.__version__);
$ python3 -c "import torch; print(torch.cuda.is_available());"
```

もし 'torch.cuda.is_available()' が True を返せば、CUDA と cuDNN が正常に動作していることが確認できる。また、'torch.backends.cudnn.version()' を実行すれば、組み込まれている cuDNN のバージョン番号も確認できる。

7 深層学習における学習ループの概念

深層学習における学習ループは図3に示すように、データ準備（データの読み込みとバッチ化）、モデル定義、モデルの実体化と学習、モデルの評価という一連のプロ

セスを繰り返すことで、モデルの性能を向上させる流れを指す。この学習ループの流れを具体的に見てみよう。まず、DNN の学習に用いる MNIST データセットを準備する。MNIST データセットは、0 から 9 までの手書き数字を集めた 28×28 ピクセルのグレースケール画像 60,000 枚の訓練データと 10,000 枚のテストデータから成る、機械学習の標準的なベンチマークである。深層学習アルゴリズムの性能評価や比較に広く利用され、画像認識タスクの入門用データセットとして多くの教材や研究論文で参照されている。本稿では、主にこの MNIST のデータでコードを解説する。

次のコードでは、MNIST データセットをダウンロードし、適切な前処理を施した後に、DataLoader API を用いてミニバッチ化を行っている。

```
import torchvision.transforms as transforms
from torch.utils.data import DataLoader
# データローディングの設定
def get_data_loaders(batch_size):
    # MNIST データセットの前処理とデータローダの設定
    transform = transforms.Compose([transforms.ToTensor(),
    transforms.Normalize((0.5,), (0.5,))])
    # 訓練データとテストデータのダウンロードと変換
    train_dataset = torchvision.datasets.MNIST(root='./data',
    train=True, download=True, transform=transform)
    test_dataset = torchvision.datasets.MNIST(root='./data',
    train=False, download=True, transform=transform)
    # データローダの作成（マルチスレッド処理と GPU
    への効率的な転送を設定）
    train_loader = DataLoader(train_dataset,
    batch_size=batch_size, shuffle=True, num_workers=4,
    pin_memory=True, persistent_workers=True)
    test_loader = DataLoader(test_dataset,
    batch_size=batch_size, shuffle=False,
    num_workers=4, pin_memory=True,
    persistent_workers=True)
    return train_loader, test_loader
```

このコード中の transforms.ToTensor() を適用すると画像データはテンソルに変換される。そして、0 から 255 の値を持つ RGB 画像の個々の画素値は transforms.Normalize((0.5,), (0.5,)) により標準化され、0 から 1 の範囲の値に変換される。更に、DataLoader を使用してデータをミニバッチ単位で取得できるようにし、順伝搬と誤差逆伝搬を一つずつの入力、出力ではなく、複数の入出力で一気に損失や重みの変化量を計算させることで学習の効率化を図る。

次に、学習モデルの定義を行う。以下のコードは、シ

ンプルな DNN モデルを定義したものである。

```
import torch.nn as nn
# DNN モデルの定義
# シンプルな多層パーセプトロンモデルを定義するクラス
class SimpleDNN(nn.Module):
    def init(self, input_size, hidden1_size, hidden2_size,
            output_size):
        super(SimpleDNN, self).init()
        self.fc1 = nn.Linear(input_size, hidden1_size)
        self.fc2 = nn.Linear(hidden1_size, hidden2_size)
        self.fc3 = nn.Linear(hidden2_size, output_size).
    def forward(self, x):
        x = F.relu(self.fc1(x))
        x = F.relu(self.fc2(x))
        x = self.fc3(x)
        return x
```

このモデルでは、入力を 3 層の線形変換 (nn.Linear) を通じて処理し、活性化関数 ReLU を用いて非線形変換を行っている。最終的に数字の 0 から 9 までの 10 クラス分類の出力を得る構造になっている。

モデルを定義した後、学習を行うためのトレーニング関数を実装する。

```
def train(model, train_loader, optimizer, criterion, device,
        num_epochs):
    model.train()
    for epoch in range(num_epochs):
        running_loss = 0.0
        for i, (inputs, labels) in enumerate(train_loader):
            inputs = inputs.view(inputs.size(0),
                                -1).to(device, non_blocking=True)
            labels = labels.to(device, non_blocking=True)
            optimizer.zero_grad(set_to_none=True)
            outputs = model(inputs)
            loss = criterion(outputs, labels)
            loss.backward()
            optimizer.step()
            running_loss += loss.item()
            if i % 100 == 99:
                print(f" [{epoch + 1}, {i + 1}] loss:
                    {running_loss / 100:.3f}")
                running_loss = 0.0
        print("学習完了")
    return model
```

このコードでは、データを GPU に転送し、順伝搬、損失計算、誤差逆伝搬、パラメータ更新を行う処理を繰り返している。optimizer.zero_grad() で勾配をリセットし、loss.backward() で勾配を計算し、optimizer.

step() でパラメータを更新する。

学習が完了したモデルの評価を行うためのテスト関数も用意する。

```
def test(model, test_loader, device):
    model.eval()
    correct = 0
    total = 0
    with torch.no_grad():
        for inputs, labels in test_loader:
            inputs = inputs.view(inputs.size(0),
                                -1).to(device, non_blocking=True)
            labels = labels.to(device, non_blocking=True)
            outputs = model(inputs)
            _, predicted = torch.max(outputs.data, 1)
            total += labels.size(0)
            correct += (predicted == labels).sum().item()
    accuracy = 100 * correct / total
    print(f'テストデータの精度: {accuracy:.2f}%')
    return accuracy
```

このコードでは torch.no_grad() を使い、テスト時の勾配計算を無効化することで計算負荷を軽減している。torch.max(outputs, 1) により最も確率の高いクラスを予測し、ラベルと比較して正解率を算出する。

このように、データの準備、モデルの定義、学習、評価というプロセスを順番に行うことで、深層学習の学習ループを構築できる。

次に、定義された関数を main 文に以下のように定義し実行する。

```
# 学習の設定と実行のためのメイン関数
def main():
    # ハイパーパラメータの設定
    input_size = 784 # 28x28 を平たん化
    hidden1_size = 128
    hidden2_size = 64
    output_size = 10
    batch_size = 16
    learning_rate = 0.001
    num_epochs = 5
    model_save_path = 'mnist_model.pth'
    # デバイスの設定と cuDNN ベンチマーキングの有効化
    device = torch.device("cuda" if torch.cuda.is_available()
                           else "cpu")
    print(f'使用デバイス: {device}')
    torch.backends.cudnn.benchmark = True
    # モデル、オプティマイザ、損失関数の作成
    model = SimpleDNN(input_size, hidden1_size,
```

```

hidden2_size, output_size).to(device)
# Adam オプティマイザの設定
optimizer = torch.optim.Adam(model.parameters(),
lr=learning_rate)
# 交差エントロピー損失関数の設定
criterion = nn.CrossEntropyLoss()
# データローダの取得
train_loader, test_loader = get_data_loaders(batch_size)
# 学習時間の計測開始
start_time = time.time()
# モデルの学習実行
model = train(model, train_loader, optimizer, criterion,
device, num_epochs)
# 学習時間の計測終了と表示
end_time = time.time()
print(f" 学習時間 : {end_time - start_time:.2f} 秒" )
# テストデータでの評価
accuracy = test(model, test_loader, device)
# モデルの保存
# モデル全体を保存
torch.save(model.state_dict(), model_save_path)
print(f" モデルを {model_save_path} に保存しまし
た" )
# モデルの構造情報も保存
model_info = {
    'input_size': input_size,
    'hidden1_size': hidden1_size,
    'hidden2_size': hidden2_size,
    'output_size': output_size,
    'accuracy': accuracy
}
torch.save(model_info, 'model_info.pth')
print(f" モデル情報を model_info.pth に保存しまし
た" )
if __name__ == "__main__":
    main()

```

また、次のコマンドを実行すれば、DNN を用いた手書きの数字を認識するモデルの学習を開始できる。

```
$ python train.py これまでに説明したコードをまとめ
たもの
```

8 GPU を用いた PyTorch の計算

本章では、PyTorch を用いて GPU 上で計算を行うための手法と注意点について解説する。

GPU はその高い並列計算能力により、DNN の学習や推論において CPU に比べて大幅な高速化を実現できる。

しかし、GPU 上で計算を行うためには、まずコード内で GPU デバイスを明示的に指定し、モデルやデータを GPU に転送する必要がある。一般的な方法は、下記のコードのように torch.device を用いてデバイスを設定する。

```

device = torch.device( "cuda" if torch.cuda.is_available()
else "cpu" )
print( "使用デバイス:" , device)

```

このコードは、もし CUDA 対応の GPU が利用可能であれば“cuda”を、そうでなければ“cpu”をデバイスとして選択する。選択後は、モデルやテンソルに対して to(device) メソッドを呼び出し、GPU にデータを転送する。例えば：

```

device = "cuda"
model = SimpleNet().to(device)
x = torch.randn(64, 784).to(device)
output = model(x)

```

この例では、ネットワークモデルと乱数で生成した入力テンソルを GPU に移し、GPU 上での順伝搬計算を行っている。GPU 上で計算を行う利点は、行列演算など大量の並列処理が必要な計算が短時間で終わる点にある。ただし、CPU と GPU 間のデータ転送は時間がかかるため、できるだけ一度 GPU に移したデータはその後も GPU 上で処理するように心掛ける必要がある。また、GPU のメモリは CPU に比べ容量が限られているため、バッチサイズやモデルサイズの調整が必要である。これらの基本的な考え方と手法を理解することで、PyTorch での高速な学習と推論が可能となる。

9 複数 GPU を用いた学習

9.1 DataParallel を利用した複数 GPU の学習

単一の GPU だけでは、非常に大規模なデータやモデルに対する学習に十分な性能が得られない場合がある。そのような場合、複数の GPU を同時に利用して学習を加速する手法が有効である。PyTorch では、**8.**で説明したように、to(device) を利用すれば、モデルやデータを GPU デバイスに転送し、計算させることが可能である。PyTorch で複数 GPU を利用する場合、主に nn.DataParallel と DistributedDataParallel の二つの方法が用意されている。

まず、nn.DataParallel は、シングルプロセス内で複数 GPU を用いてミニバッチごとにデータを自動的に分割し、各 GPU で並列に計算を実施した後に結果を統合する。使用法は非常に簡単で、モデルを作成した後に次のようにラップするだけである。

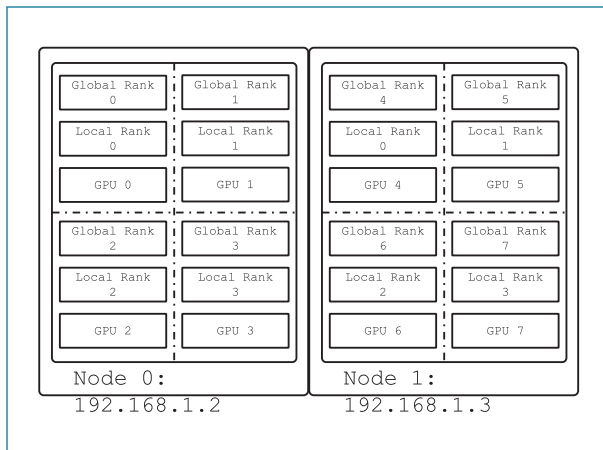


図4 DDP を利用した分散学習

```
if torch.cuda.device_count() > 1:
    print(f"利用可能な GPU 数: {torch.cuda.device_count()}")
    model = nn.DataParallel(model)
    model.to(device)
```

この方法は初心者にとって実装が容易であるが、内部的にはシングルプロセスでのマルチスレッド実行となるため、GPU 間の通信オーバーヘッドが発生することがある。より大規模な学習や通信オーバーヘッドを極力抑えたい場合は、図4に示すように各 GPU に専用プロセスを割り当てる DistributedDataParallel (DDP) を利用した分散学習が推奨されている。DDP では、各プロセスがそれぞれ独立して学習を行い、バックプロパゲーション時に勾配が同期されるため、よりスケラブルな並列学習が可能である。DDP を使用する場合は、環境変数やプロセス間通信の初期化が必要となる*。どちらの手法も、複数 GPU を効果的に利用することで、学習時間を大幅に短縮できるため、実際の大规模実験においては非常に有用である。まずは簡単な実験として DataParallel から試し、必要に応じて DDP に移行するのが現実的なアプローチと言えるだろう。

9.2 DDP を利用した複数 GPU の学習

DDP では、各プロセスに Global Rank と Local Rank が割り当てられる。Global Rank はクラスタ全体での識別番号を示し、Local Rank は各ノード内での識別番号を示す。このランク情報を基に、データと計算が適切に分割・同期される。

単一の GPU を用いて PyTorch で DNN を学習させている環境を分散学習に変更するためには、幾つかの修

正が必要となる。本節では、DDP を導入する際に最小限書き換えるべきポイントを説明する。

まず、デバイス設定の変更が必要となる。8. で説明した `to(device)` の方法から、以下の分散環境に適用するために各 GPU に異なるデバイス ID を設定する。

```
device = torch.device(f"cuda:{rank}") if
torch.cuda.is_available() else "cpu" )
model.to(device)
```

また、通常の PyTorch モデルを分散学習用に DDP でラップする。

```
from torch.nn.parallel import DistributedDataParallel as DDP
...
model = DDP(model, device_ids=[rank],
find_unused_parameters=False)
```

次に、データローダの変更が必要となる。単一 GPU ではデータローダを以下のように作成する。

```
train_loader = DataLoader(train_dataset,
batch_size=batch_size, shuffle=True)
```

分散学習環境では、DistributedSampler を使用して各 GPU に異なるデータを割り当てる。

```
from torch.utils.data.distributed import DistributedSampler
...
train_sampler = DistributedSampler(train_dataset,
num_replicas=world_size, rank=rank, shuffle=True)
train_loader = DataLoader(train_dataset,
batch_size=batch_size, sampler=train_sampler, ...)
```

学習ループの中では、エポックごとに `train_loader.sampler.set_epoch(epoch)` を呼び出し、データの分配が適切に行われるようにする。

```
def train(model, train_loader, optimizer, criterion, device,
num_epochs, rank):
    model.train()
    for epoch in range(num_epochs):
        train_loader.sampler.set_epoch(epoch)
        for inputs, labels in train_loader:
            inputs, labels = inputs.to(device,
non_blocking=True), labels.to(device, non_blocking=True)
            optimizer.zero_grad(set_to_none=True)
            outputs = model(inputs)
            loss = criterion(outputs, labels)
            loss.backward()
            optimizer.step()
        if rank == 0:
```

* 公式ドキュメントに詳細な手順が記載されている。
https://docs.pytorch.org/tutorials/intermediate/dist_tuto.html

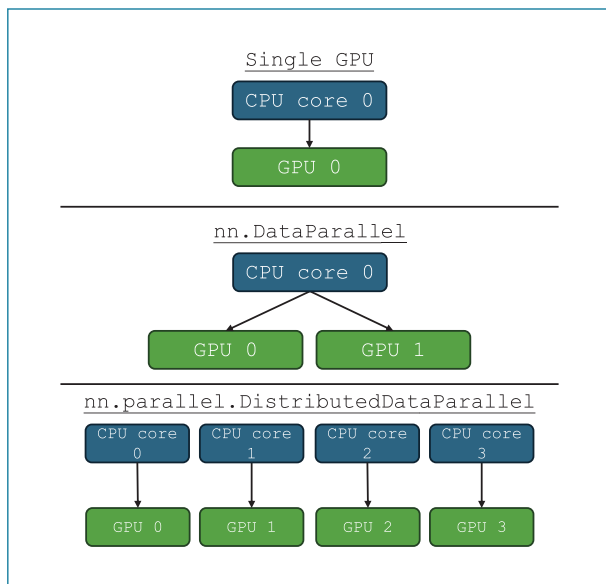


図5 GPUにおける並列化の違い

```
print(“学習完了”)\nreturn model
```

また、分散環境ではランク 0（マスタノード）のみがモデルを保存するように制御する。

```
if rank == 0:\n    torch.save(model.module.state_dict(), “mnist_model_\nddp.pth”)
```

最後に、分散環境の初期化が必要である。torch.distributed.init_process_group を用いて、各プロセスを適切に設定する setup 関数と cleanup 関数を使う必要がある。main 文を呼び出す際は、torch.multiprocessing でプロセス数を呼び出すことで、分散学習が可能になる。

```
import torch.multiprocessing as mp\ndef setup(rank, world_size):\n    os.environ[“MASTER_ADDR”] = “localhost”\n    os.environ[“MASTER_PORT”] = “12355”\n    dist.init_process_group(“nccl”, rank=rank,\nworld_size=world_size)\ndef cleanup():\n    dist.destroy_process_group()\n...\nif __name__ == “__main__”:\n    # 利用可能な GPU の数を取得して、その数だけプロセスを起動\n\n    world_size = torch.cuda.device_count()\n    # 複数のプロセスを起動して分散学習を実行
```

```
mp.spawn(main, args=(world_size,), nprocs=world_size,\njoin=True)
```

このように、必要最小限の変更を加えることで、単一 GPU のコードを分散学習環境に適応させることができる。DDP を導入することで、各プロセスが独立して学習を行いながら勾配を同期し、モデルの学習を高速化できる。

10 終わりに

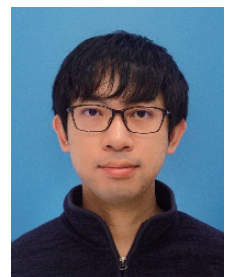
本稿では、PyTorch を用いた GPU 活用による深層学習の基礎から応用までを解説した。深層学習の背景と GPU の役割、PyTorch の基本操作、GPU 計算の設定方法を説明し、単一 GPU と複数 GPU を用いた並列学習手法の違いを整理した。今後は自動混合精度学習 (Automatic Mixed Precision, AMP) や新たなコンパイル機能の導入により、より高速かつ効率的な学習が期待される。また、本稿のソースコードを https://github.com/nishizaki-lab/basic_pytorch で公開しているので、本稿と併せて PyTorch 初心者の GPU 活用の理解と実践の一助となれば幸いである。

■ 文献（サイト閲覧は 2025 年 2 月 27 日）

- (1) NVIDIA, “What is cuda?,” Feb. 2025.
- (2) NVIDIA Corporation, “Cuda toolkit archive,” 2024.

レオ チー シャン

2018 山梨大・工・メカトロニクス卒、2020 同大学院医工農学総合教育部修士課程了、2024 同博士課程了。博士（工学）。2024-04 山梨大大学院総合研究部助教。専門は深層学習。主な研究テーマは、人工知能技術の音声認識やコンピュータビジョン、スマート農業への応用。情報処理学会会員。



西崎博光（正員：シニア会員）

1996 津山高専卒。1998 豊橋技科大・工・情報卒。2000 同大学院工学研究科修士課程了。2003 同大学院博士課程了。博士（工学）。2003 山梨大大学院助手。2016 同大学准教授を経て、2022 同大学教授。この間、2015 国立台湾大客員研究員。専門はマルチメディア情報処理。主な研究テーマは、音声認識・画像認識などのマルチメディア情報に対する人工知能技術。人工知能技術のスマート農業や教育応用などの社会実装にも力を入れている。



何度も訪れたい 「いせ」

三重大大学 眞田耕輔 Kosuke Sanada

街plus
探訪



1 はじめに

筆者が初めて三重県を訪れたのは2015年、三重大の教員採用面接のときでした。それまでは三重はおろか、名古屋にも訪れたことがほとんどなく、東海エリアにはゆかりはありませんでしたが、御縁があり三重大の教員に採用して頂き、今日まで勤めています。それから、同僚の先生や友人に三重県内の面白いスポットに連れて行ってもらいながら、三重県の魅力を教えて頂きました。

本稿では、筆者がこれまで訪れた県内のスポットの中でも、特に何回も訪れた、そしてこれからも何度も訪れたいスポットである「伊勢神宮」とその周辺の街探索を紹介します。伊勢神宮は言うまでもなく日本で最も格式の高い神社ですので、その詳細は文献、ホームページなどでも広く紹介されています。本稿ではそのような詳細は文献などに委ねるとして、実際に伊勢を訪れて街を探索している気分になって頂けるよう、伊勢市駅からの参拝ルートに沿って、伊勢市周辺と伊勢神宮について紹介していきます。本稿を執筆するにあたり、取材も兼ねて友人と伊勢神宮に参拝に行ってきました。本稿を読んで、伊勢や三重県まで足を運ぶきっかけとなれば幸いです。

2 伊勢神宮までのアクセスと三重県

伊勢神宮外宮の最寄り駅は、近鉄伊勢市駅と宇治山田駅です（図1）。伊勢市駅にはJRと近鉄の駅が併設しており、名古屋駅からの所要時間は、近鉄特急を利用して1時間30分ほどです。名古屋からの特急にはいくつか種類があり、観光特急「しまかぜ」では、家族連れのスペースや特別席が用意されています。名古屋から伊勢に向かう途中には、三重県最大の工業地帯の四日市市、鈴鹿サーキットで有名な鈴鹿市、県庁所在地

と三重大がある津市、松阪牛（「まつさかぎゅう」ではなく「まつさかうし」と呼びます。）で有名な松阪市があります。津市から奈良方面へ向かうと忍者で有名な伊賀市があります。伊勢を越えて南へ進むと、「2016



図1 伊勢市周辺マップ（地図データ ©2024 Google）

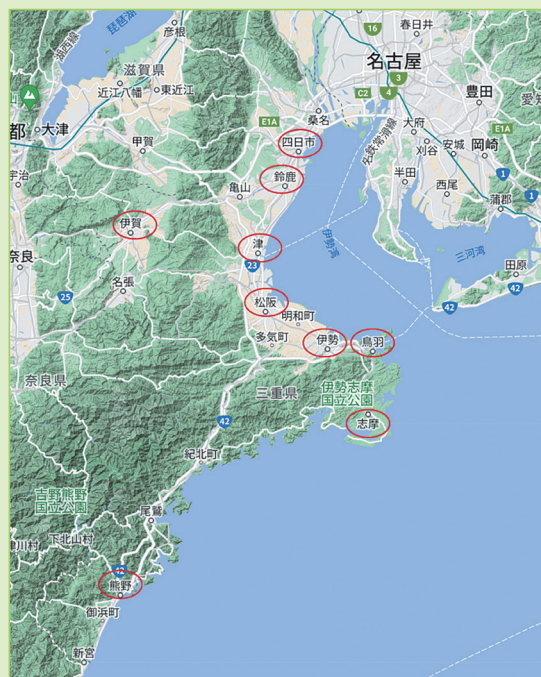


図2 山林と伊勢湾に囲まれた三重県（地図データ ©2024 Google）



(a) 外宮参道



(b) 伊勢の地ビール



(c) 伊勢うどん

図3 外宮参道周辺グルメ

年 G7 伊勢志摩サミット」が開催された賢島、牡蠣小屋や水族館などで有名な鳥羽市や志摩市があります。更に南へ下っていくと森林が生い茂る世界遺産の熊野古道があります。図2の地図にもあるように、三重県は山林と海に囲まれており、農業、工業、水産、観光と一通りそろっているのが特徴です。また、関西の文化と東海の文化のちょうど境目に位置しており、料理の味付けや方言などが県内でも地域によって異なるのも興味深いです。

3 伊勢神宮内宮と外宮について

伊勢神宮は、日本を代表する神社で約2000年の歴史を誇ります。主に「外宮（げくう）」と「内宮（ないくう）」の二つのお宮から成っており、外宮では衣・食・住の神様、豊受大御神（とようけのおおみかみ）、内宮では太陽の神様、天照大御神（あまてらすおおみかみ）をお祀りしています。図1の伊勢市周辺マップにあるように、外宮と内宮は同じ境内にあるのではなく、距離が離れています。古くから「外宮から内宮へ」と順に参拝する風習があり、多くの人々に親しまれています。



図4 清盛楠（写真提供 神宮司庁）

4 外宮とその周辺

4.1 外宮参道

伊勢市駅を降りると、外宮の入口まで参道が続いています。この参道沿いには観光客向けのお店があり、伊勢の郷土料理である「伊勢うどん」や伊勢の地ビール、餅菓子の「赤福」などを楽しむことができます（図3）。

4.2 清盛楠

外宮の鳥居をくぐると、すぐ右手に、一際大きく曲がった立派な楠の木を見ることができます（図4）。この楠の木は「清盛楠」と呼ばれ、平清盛が勅使として伊勢神宮に参詣した際に、この楠の木に冠をぶつけたため、その枝が切り落とされたという伝承があります⁽¹⁾。樹齢は1,000年近いと言われ、その堂々とした風貌からは、日本の歴史上の人物も含む多くの参拝者を入り口で最初にお迎えしてきたという威厳と貫禄を感じます。清盛楠は伊勢神宮内のひそかなパワースポットとされており、伊勢神宮を参拝する際はまずこの清盛楠を訪れ、パワーを感じてから参拝に向かうとよいでしょう。



図5 伊勢神宮外宮正宮（写真提供 神宮司庁）



図6 喫茶モリの「モリスパ」

4.3 外宮

外宮は正式な名称を「豊受大神宮」と言い、内宮の天照大神の食事を司る神様である「豊受大御神」を祀っています（図5）。外宮域内に外宮正宮とその次に格の高い別宮である「多賀宮」「土宮」「風宮」があります。外宮域内には、幾つもの立派な杉の大木があり、長年にわたり参拝者がその杉の大木に触れてきたため、杉の木肌がツルツルになっています。思い返してみると、ここまで木肌がツルツルになった杉の大木は、伊勢神宮内でしか見られないかと思います。それほど長い間、多くの人に愛されてきた神聖な場所であることを再認識させてくれます。

4.4 伊勢ソウルフード「モリスパ」

伊勢の定番グルメ、赤福、伊勢うどん、伊勢えびなどは全国的にも有名ですので、この記事を読まれている方も御存じかと思います。ここでは、伊勢のソウルフードとして地元の方々に長く愛されているグルメを紹介します。その一つが、宇治山田駅から徒歩約3分にある「喫茶モリ」が提供しているスパゲッティ、通称「モリスパ」です（図6）。筆者が初めてこのモリスパを食べたのは、伊勢で開催された研究会の昼食休憩のときでした。筆者はこの研究会のローカルホストでありながら、このモリスパのことを知らず、研究会に参加された先生に勧められて一緒に食べに行ったのでした。独特の“オイリー”さと濃い味が癖になるスパゲッティで、研究会を終えて2〜3日たっても、その余韻に浸るほど印象深い味だったことを覚えています。「モリスパ」のほかにも、ソウルフードと呼ばれる名物グルメを提供している店（文献(2)）が宇治山田駅周辺にありますので、伊勢の定番グルメを一通り味わった後は、是非試してみてください。

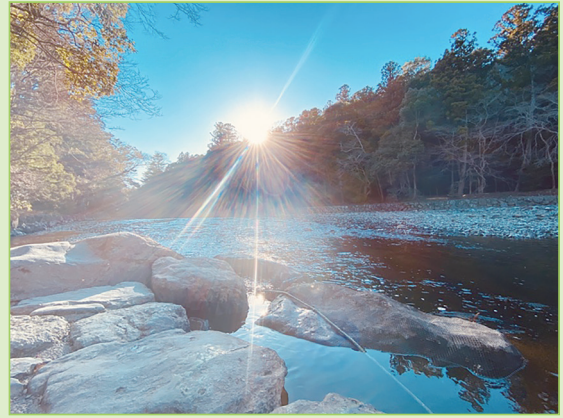


図7 内宮域内、五十鈴川の御手洗場（写真提供 神宮司庁）



図8 伊勢神宮内宮正宮（写真提供 神宮司庁）

5

内宮

5.1 外宮から内宮まで

外宮入口から内宮入口まではバスを利用すると非常に便利で、所要時間は15分です。徒歩の場合、外宮から内宮まで1時間程度かかります。正月など参拝客の多い時期には臨時便が増発されるため、スムーズに内宮まで移動することができます。電車を利用する際は近鉄五十鈴川駅で下車し、徒歩30分で内宮入り口に到着します。毎年11月初旬に開催される全国大学駅伝のゴール地点は、伊勢神宮内宮です。

5.2 内宮域内

内宮域内には、正宮「皇大神宮」と別宮「荒祭宮」「風日祈宮」があります。正宮に向かう途中に、「お清め」のための御手洗（みたらし）場として利用される五十鈴川が穏やかに流れています（図7, 8）。周囲は山と森に囲まれており、とても澄んだ空気と自然を満喫できます。



図9 多くの人でにぎわう「おかげ横丁」



図10 すし久の手こね寿司

5.3 おかげ横丁

伊勢神宮内宮入口からすぐそばに「おかげ横丁」があります。特産品や郷土料理を扱う50以上の店が軒を連ねており、いつ訪れても多くの人でにぎわっています。家族連れや友人、恋人同士でも、とても楽しめるスポットです（図9）。おかげ横丁のお勧めグルメとして、伊勢の郷土料理「手こね寿司」を紹介します。図10にあるように、酢飯の上に甘辛い醤油に漬けた分厚い鰹の切り身をのせたお寿司です。外宮周辺でも手こね寿司を提供するお店は多くあります。中でも特にお勧めしたいのがおかげ横丁の「すし久」で提供される手こね寿司です。鰹の切り身が特に厚く、非常に食べ応えがあります。また、座敷からは五十鈴川を眺めることができ、風情のある建物と相まって郷愁を誘います。

6 学会会場としての伊勢市

私はこれまで伊勢で開かれた研究会や委員会でもローカルホストを3回務めました。その際、会場としてよく利用するのが、シンフォニアテクノロジー響ホール（伊勢市観光文化会館、図11）です。会議室の広さ、利用料金ともに研究会の開催に適しており、大変助か



図11 シンフォニアテクノロジー響ホール

りました。また、観光地なので、ホテルや懇親会会場の選定に困ることはありません。研究会開催地でも困りの研究会幹事の皆様、伊勢での研究会開催はいかがでしょう。

7 おわりに

伊勢神宮の参拝を中心に、三重県の魅力を紹介させて頂きました。私自身、元々、東海地方や三重県にほとんどゆかりはありませんでしたが、三重大への着任をきっかけに、三重県の様々な文化や魅力を学ばせて頂きました。歴史は非常に長く、調べれば調べるほどその奥深さを知り、どのようにまとめるべきかを迷いました。結果、開き直って、自分のこだわりの参拝ルートについて紹介する形としました。是非本稿をきっかけに伊勢や三重県まで足を運んで頂けると幸いです。「一生に一度はお伊勢参り」とは言いますが、何度でも訪れて頂いても構いません。そのたびに、皆様を変わず温かく迎えてくれます。「いせ」は私たちの心の故郷です。

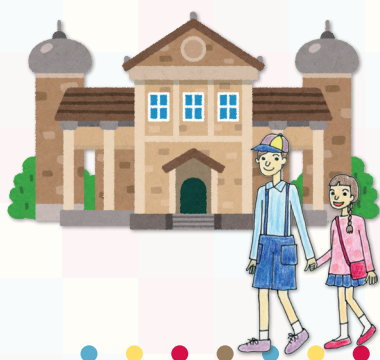
文献

- (1) “清盛楠，公益社団法人伊勢市観光協会。” <https://ise-kanko.jp/purpose/kiyomorigusu/>
- (2) “観光三重。” <https://www.kankomie.or.jp/report/1371>
- (3) “おかげ横丁。” <https://okageyokocho.com/main/>

眞田耕輔（正員）

2011 千葉大・工・情報画像卒。2012 同大学院融合科学研究科修士課程了。2015 同博士課程了。2015 同大学院博士研究員。2016 三重大大学院工学研究科電気電子工学専攻助教。現在に至る。博士（工学）。





千葉市科学館

木下雅之 Masayuki Kinoshita 千葉工業大学

1 はじめに

今回の「科学館・博物館めぐり」は千葉市科学館を紹介します。千葉市科学館は複合施設「きぼーる」(図1)の7階から10階までに位置します。

千葉市科学館は「日常の身近なところから科学へ」をキーコンセプトに、日常の視点で科学を捉えた、子供から大人まで幅広い年齢層が楽しめる参加体験型の科学館です。館内には150もの体験展示が設置されています。常設展示のほかに、人気コンテンツのプラネタリウム、季節ごとの展覧会や企画展示、年間を通して様々なイベントが開催されています。また、ミュージアムショップでは科学に関するグッズや千葉市科学館オリジナルグッズを購入することができます。今回は各フロアの見どころを順に紹介していきます。

2 プラネタリウム

きぼーるに入館すると1階は吹き抜けとなっており、プラネタリウムの球体を下から見上げることができます(図2)。エレベータで7階に上がると千葉市科学館のエントランスがあります。7階には、科学館の目玉であるプラネタリウムがあります。プラネタリウムは、ドーム径23m、座席数200席と千葉県内最大の大きさです。

光学式の恒星投影機とCG映像を映すデジタル式を併用するハイブリッド方式のプラネタリウム施設です。2025年1月のリニューアルにより納入された最新鋭のシステムは、天の川の構造を再現できる1億個の高精細な星空を映し、まるで本物のような美しい星空が楽しめます(図3)。中には双眼鏡を持参して星を見る方も



図2 プラネタリウムの外観



図1 「きぼーる」の外観

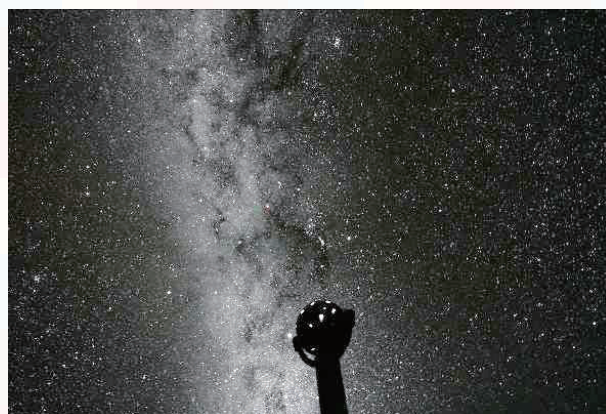


図3 1億個の星を投影するプラネタリウム

いるそうです。投影番組の種類も豊富で、専門スタッフによる生解説、学習投影、子供向け番組のほか、音楽コンサート、アロマ、ヨガと星空を組み合わせた特別投影も企画されています。筆者が訪れた2025年3月時点では10種類以上の番組がありました。

3 ワンダータウン

8階には、科学の原理・法則を体験できるワンダータウンがあります。視覚、音、光、数、からだの不思議に関する展示があり、身の回りの様々な現象を体験しながら楽しく学ぶことができます。「音の不思議」コーナー(図4)では、パラボラ音声伝送や音で砂模様を描く展示など、音を様々な形で体験・可視化することができます。「光の不思議」コーナーでは、光の透過、反射、屈折などの性質で遊ぶ体験展示(図5)があります。「からだの不思議」コーナーでは、動体視力や反応力などをゲーム感覚で測定することができます。是非お試しください。筆者が訪れた日は、多くの子供たちでにぎわっていましたが、大人の方も体験展示を楽しんでいました。



図4 音の不思議コーナー

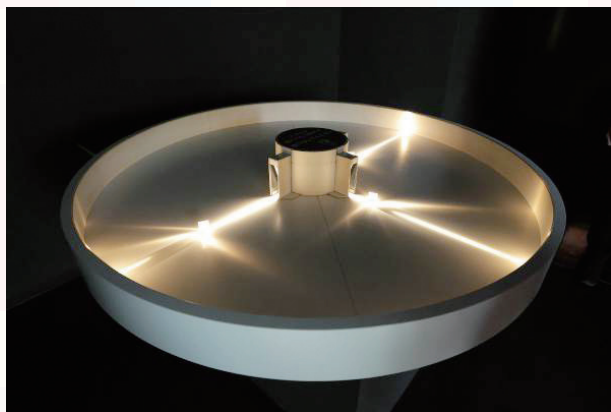


図5 プリズムによる光の屈折

4 テクノタウン

9階には「暮らしを支える技術を通し、その原理をひも解く」をテーマにしたテクノタウンがあります。産業技術や資源探索に関する展示があります。注目の展示は、実物大の有人潜水調査船「しんかい6500」です(図6)。「しんかい6500大解剖」と題した構造の説明や、コックピットの内部を見学することができます(図7)。また、マニピュレータの操作体験ができる展示もあります。筆者が訪れた日は、子供たちが順番待ちして挑戦していました。そのほか、昔のテレビやラジオ、オーディオ機器などを展示したヒストリーロードや、車の仕組みを解説するスケルトンカー、深海探査機「江戸っ子1号」などの展示があります。

5 ジオタウン

10階には宇宙と地球、自然と生命などスケールの大きな科学をテーマにしたジオタウンがあります。このフロアの中央には南極のニュートリノ検出器「アイスクューブシミュレーター」の展示があります(図8,9)。目に見えず、物質のほとんどをすり抜ける性質を持ち、「幽霊粒子」とも呼ばれるニュートリノがどのように検出されるのか、その仕組みを知ることができます。アイ



図6 実物大の「しんかい6500」



図7 「しんかい6500」のコックピット



図8 ニュートリノ検出器「アイスキューブシミュレーター」

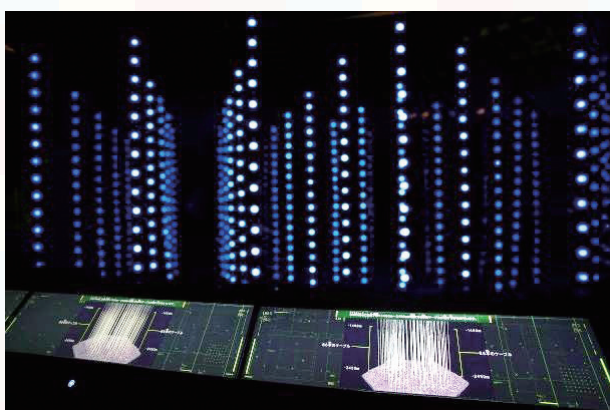


図9 ニュートリノ検出の仕組み紹介展示

スキューブの展示が見られるのは国内では千葉大と千葉市科学館のみです。「宇宙を語る」のコーナーでは、ロケットエンジン、小惑星探査機「はやぶさ2」、月面用の有人圧ローバ「ルナクルーザー」などの展示があり、宇宙開発の歴史や動向を学ぶことができます。また、月の重力を疑似体験できる「ムーンウォーカー」は月面を歩いている感覚を楽しむことができます。

6 おわりに

今回は、千葉市科学館を紹介させていただきました。冒頭でも紹介したように参加体験型の展示が非常に多く、子供だけでなく大人も楽しめる科学館であると感じました。展示のほかにも、ボランティアの方々による工作体験などのワークショップや、実験室を使った講座など豊富なイベントなどが開催されます。「大人が楽しむ科学教室」と題した大人向けのイベントも定期的に開催されるそうですので、是非参加してみてください。

Access

千葉市科学館

開館時間：午前9時～午後7時

プラネタリウム：午前9時～午後8時

休館日：不定休（科学館ホームページから御確認下さい）、
年末年始（12月29日～1月1日）

所在地：〒260-0013 千葉県千葉市中央区中央4-5-1

交通：JR千葉駅徒歩15分、京成電鉄千葉中央駅徒歩6分、
千葉市モノレール葭川公園駅徒歩5分

URL：<https://www.kagakukanq.com/>

木下雅之（正員）

2014 名大・工・電気電子情報卒。2016 同大学院博士前期課程了。2019 同大学院博士後期課程了。博士（工学）。同年千葉工大・情報通信システム工学科・助教。2022 千葉工大・情報通信システム工学科・准教授。可視光通信の研究に従事。IEEE 会員。



2024年度 通信ソサイエティ論文賞・マガジン賞 ～受賞論文・記事と総評～

通信ソサイエティ編集会議

1 はじめに

通信ソサイエティは、20回目となる2024年度通信ソサイエティ論文賞の選考を行い、11編の論文を選定した。また、和文マガジンの論文以外の記事も対象とする「通信ソサイエティマガジン賞」（以下、マガジン賞）の8回目の選考を行い、1編を選定した。

本稿では、今年度（2023年10月～2024年9月）の受賞論文・記事と総評を、和文論文誌、英文論文誌、ComEX、和文マガジン、及びマガジン賞の順に紹介する。

2 和文論文誌

和文論文誌は、研究経験の少ない学生や若手研究者、開発に携わる企業の技術者も母国語で読める貴重な文献である。和文論文誌の編集委員会では、1) 候補論文推薦、2) 予備投票、3) 審査査読、4) 候補論文絞込み（審議）、5) 候補論文選定（投票）、6) 受賞論文決定（編集会議）のステップを経て、優秀論文賞3編、チュートリアル論文賞1編を受賞論文として選定した。

優秀論文賞は、複数台の光ファイバ給電デバイスの給電及び機能実行のための割当時間算出方法に関する論文、分散アンテナシステムへの電力供給と制御に関する論文、Wi-Fiの受信信号強度とスマートフォンを用いた屋内位置推定システムの開発に関する論文の3編である。また、チュートリアル論文賞は、後方散乱通信の原理と技術課題について解説した招待論文である。いずれも、新規性、有効性、信頼性、了解性で高い評価を得ており、今後論文を執筆する研究者や技術者にとってお手本となるものである。

良い論文を読むことは、技術知識の蓄積とともに、良い論文を書くことにもつながる。受賞論文を論文執筆のお手本として、各位の技術成果を積極的に投稿して頂きたい。今後も新規性の高い論文から綿密な調査と体系化を行うサーベイ論文まで、幅広い成果が報告されること

を期待している。なお、2006年以降の各受賞論文は下記URLから無償で閲覧できるので、御活用頂きたい。

https://search.ieice.org/bin/open_access_paper.php?journal=JB&lang=J

■ 優秀論文賞

「複数台の光ファイバ給電デバイスの給電及び機能実行のための割当時間算出方法」

野添紗希, 渡辺 汎, 大串幾太郎

Vol. J107-B, No. 10, pp. 489-497, Oct. 2024.

受賞理由：本論文は、光ファイバを用いて電力供給と通信を行う次世代の光通信網において、複数台のデバイスの光給電及び機能実行の割当時間の算出方法を提案している。光ファイバ給電の実現に向けては、少ない電力を効率良く確保してデバイスを動作させるため、新たな発想と注意深い検討が必要である。筆者らは各ノードを充電しつつファイル更新時間を分割して巡回し、複数ノードの機能が停止することなく更新可能となる手順を提案し、更新完了時間を算出できることを具体的に示した。本論文は複数デバイスを対象とした光給電の安定動作に重要となる課題を初めて指摘し、その対策を提案したことに高い新規性が認められる。また、提案手法及び電圧シミュレーションと測定による妥当性の検証手法が丁寧に述べられており、読者が実践的に論文を利用できる点においても有効性が高い。以上のことから、通信ソサイエティ優秀論文賞にふさわしい論文であると判断した。

「分散アンテナシステムへの電力供給と制御に関する研究」

唐 琼顔, 山田博仁

Vol. J107-B, No. 3, pp. 91-98, March 2024.

受賞理由：本研究は、分散アンテナシステムのリモートアンテナへの電力供給と制御について、ソーラーパネルとバッテリーを備えた耐災害性に配慮した自立電源システムを構築し、電力の不足分を収容局からの送電

(複合フロントホール)で補う点に新規性がある。更に、災害時におけるリモートアンテナの消費電力節約のため、送信電力の低減を行う縮退運転の提案がされている。

本論文では、太陽電池やバッテリーの価格、アンテナの消費電力、電力持続時間など様々な条件を理論とシミュレーションに基づいて定量的に示し、実現可能性に関する信頼性が示された。これにより、災害時のリモートアンテナ通信持続時間の延長に対する有効性ととも、高い実用性が示された。また、本論文は、分野外の技術者が読んでも大まかな内容がつかめるよう丁寧かつ明快に記述されており、了解性に優れている。各種シミュレーション結果や理論の説明も視覚的に分かりやすく提示されており、多くの読者にとって理解しやすい内容である。これらの理由から、本論文は災害時の移動通信インフラの強化に向けて有意義な提案をしており、通信ソサイエティ優秀論文賞にふさわしいと判断した。

「大学構内における Wi-Fi の受信信号強度とスマートフォンを用いた屋内位置推定システムの開発」

田中空斗, 足立裕基, 小松和暉, 宮路祐一, 上原秀幸
Vol. J107-B, No. 3, pp. 209-217, March 2024.

受賞理由: GPS を利用した位置情報サービスが世の中に普及して久しいが、GPS が利用できない屋内での位置情報サービスを提供する手段として Wi-Fi が注目されている。Wi-Fi を利用した屋内位置推定技術も以前から研究されているが、実用上有効な精度を得るには、電波強度の事前実測や事前学習、モデル化・統計処理・補正処理、更には専用サーバやアクセスポイントの追加が必要になることが多く、導入や維持に掛かるコストや労力を抑えることが課題となっている。著者らはこのような課題を解決するために、大学構内の既設 Wi-Fi 設備のみを利用した簡易な三次元位置推定システムを開発し、実証実験によりその有効性を示した。提案手法によれば、追加の設備導入だけでなく実測データを用いた事前学習も不要であり、大幅なコスト低減が期待できる。また、著者らが開発したシステムは、位置推定に必要な処理がスマートフォン上のアプリとして提供されるなど、システムとしても洗練されている。更に本論文では、実証実験の結果だけでなく、提案内容のコンセプトから技術的詳細まで明解に記述されており、専門家に限らず多くの読者にとって有益な論文として仕上がっている。以上の理由により、通信ソサイエティ優秀論文賞にふさわしい論文であると判断した。

■ チュートリアル論文賞

「後方散乱通信の原理と技術課題」

三次 仁

Vol. J107-B, No. 3, pp. 230-241, March 2024.

受賞理由: 本論文は、電波の反射を利用した後方散乱通信の基本原理、技術課題とその解決に向けた取組みを解説したものである。基本原理の説明では、テブナン等価回路や数式を用いて基本メカニズムを明示し、読者の理解を深める構成となっている。また、国際標準プロトコルの IQ 信号の実測データが示されており、後方散乱通信を基礎から学びたい読者にとって有益である。技術課題については、変調方式、チャネル、多元接続方式、複信方式に関する関連研究や実測データを交えながら解説され、最新の研究動向を把握できる。

3 英文論文誌

英文論文誌では、正員や編集委員から推薦された論文を適切かつ公平・公正に審査するために論文賞選定委員会を組織し、編集委員の中から専門分野や編集経験、所属組織などを考慮して論文賞選定委員（以下、選定委員）を選出した。その後、論文賞選定委員会を複数回開催し、議論・審査を経て受賞論文を選定した。

受賞論文の選定は、1) 一次審査、2) 二次審査、3) 論文賞選定委員会での議論・投票、4) 編集委員会での審議、5) 編集会議での審議、の順序で行った。最初の 1) 一次審査では、推薦された各論文に対して選定委員が簡易査読を行い、順位付けを行った。なお、一次審査では論文の絞り込みを行わなかった。更に 2) 二次審査において、一次審査を通過した全候補論文を選定委員が熟読し、新規性、信頼性、有効性などの項目に関して詳細な評価を行った。その後 3) 論文賞選定委員会を開催し、各候補論文について二次審査結果を基に議論した後、投票によって受賞論文案を決定した。受賞論文案は更に 4) 編集委員会での審議し、5) 編集会議での議論を経て受賞論文が最終的に決定された。

本年度は、通信ソサイエティ論文賞として Best Paper Award に 2 編、Best Tutorial Paper Award に 3 編の論文が選ばれた。各受賞論文は、新規性、独創性、有効性、了解性などに関してそれぞれ秀でた特徴を有しており、情報通信分野への高い貢献が期待できる。

英文論文誌では、2006 年以降の受賞論文全てを下記 IEICE Transactions Online にて掲載している。また、2024 年 2 月掲載分からの全ての論文は、IEEE Xplore にてオープンアクセスで公開されている。是非、各受賞論文を御覧頂き、研究・開発・教育等の活動に役立て頂きたい。

IEICE Transactions Online

https://search.ieice.org/bin/open_access_paper.php?journal=EB&lang=E

IEEE Xplore

<https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=10400553>

なお、本年は受賞に該当する論文がなかったが、論文カテゴリ「ポジションペーパー」も、論文賞の対象となっている。新規性あふれる提案や世界最高性能実現の報告など高いインパクトを有する研究成果は、是非ポジションペーパーカテゴリへ積極的に投稿頂きたい。ポジションペーパーの詳細は下記 URL に記載されている。

<https://www.ieice.org/cs/jpn/EB/positionpaperJ.html>

■ Best Paper Award

“A Novel Remote-Tracking Heart Rate Measurement Method Based on Stepping Motor and mm-Wave FMCW Radar”

Yaokun HU, Xuanyu PENG, Takeshi TODA

Vol. E107-B, No. 6, pp. 470-486, June 2024.

受賞理由：本論文は、非接触バイタルサイン測定において、移動する被測定者の心拍数を測定するためのレーダベースの適応追跡法を提案している。提案手法は、レーダモジュールを円形プレートに固定してステップモータで回転させ、被測定者の位置を検出して測定範囲を自動調整する仕組みを特徴としている。更に、独自の信号処理アルゴリズムを組み合わせることで、歩行中の被験者の心拍を高精度に計測する手法を確立している。この成果は、従来技術では実現できなかった実環境での心拍モニタリングを可能とし、高齢者見守りなど社会的ニーズの高い応用分野への展開が期待できる。以上の理由から、Best Paper Award としてふさわしいと判断した。

“Cascaded Deep Neural Network for Off-Grid Direction-of-Arrival Estimation”

Huafei WANG, Xianpeng WANG, Xiang LAN, Ting SU

Vol. E107-B, No. 10, pp. 633-644, Oct. 2024.

受賞理由：本論文は、DOA 推定の課題であるグリッド外誤差に対し、カスケード型ディープニューラルネットワークを提案し、エンドツーエンドでの高精度推定を実現している。オートエンコーダによる観測データ補正とディープ CNN による誤差予測を統合した設計により、従来手法を上回る精度と汎用性を達成している。多様な条件下での性能検証や従来手法との詳細な比較は、学術的信頼性と実用的意義を高めており、多くの読者にとって有益な論文である。以上の理由から、Best Paper Award としてふさわしいと判断した。

■ Best Tutorial Paper Award

“Global Navigation Satellite System Precise Positioning Technology”

Nobuaki KUBO

Vol. E107-B, No. 11, pp. 691-705, Nov. 2024.

受賞理由：本論文は、全球測位衛星システム (GNSS) 測位技術の最新動向を包括的かつ体系的に解説されている論文である。特に、RTK-GNSS, PPP-RTK, PPP などの補正データ技術の進展と、それらがスマートフォンレベルでの高精度測位を可能にした過程が明快に記述されている。更に、自動運転車やドローンなどの新たな応用分野における技術課題や、若手研究者育成のための取り組みまでを広く網羅しており、分野外の技術者にとっても有用なリファレンスとなる優れた論文である。以上の理由から、Best Tutorial Paper Award としてふさわしいと判断した。

“D2EcoSys: Decentralized Digital Twin EcoSystem Empower Co-Creation City-Level Digital Twins”

Kenji KANAI, Hidehiro KANEMITSU, Taku YAMAZAKI, Shintaro MORI, Aram MINE, Sumiko MIYATA, Hironobu IMAMURA, Hidenori NAKAZATO

Vol. E107-B, No. 1, pp. 50-62, Jan. 2024.

受賞理由：都市レベルのデジタルツインによるスマートシティ構築において、3D 都市モデルの作成だけでなく、多様な関係者を巻き込んだエコシステムの構築が重要である。この課題に対し、「分散型デジタルツインエコシステム (D2EcoSys)」プロジェクトでは、都市サービスや価値の時空間的な発展を目指すエコシステムの構築を進めている。本論文では、プロジェクトの概要と最新のネットワーキング技術に関する研究成果を論じ、柏の葉スマートシティでのテストベッド構築について述べたものとなっている。構成がしっかりしており、分野外の技術者が読んでもデジタルツイン技術の概要がつかめるように丁寧に記述されている。以上の理由から、Best Tutorial Paper Award としてふさわしいと判断した。

“Multi-band Optical Networking: Recent Advances toward IOWN All-Photonics Network”

Masahiro NAKAGAWA, Haruka MINAMI, Takafumi FUKATANI, Takeshi SEKI, Rie HAYASHI, Takeshi KUWAHARA

Vol. E107-B, No. 12, pp. 842-851, Dec. 2024.

受賞理由: IoT や AI の普及に伴い、光ネットワークの進化が求められており、革新的な光無線ネットワーク (IOWN) の重要要素であるオールフォトンクスネットワーク (APN) の実現に向けた研究開発が進められている。多帯域ネットワークは APN の実現に向けた有望な容量拡張ソリューションとなっており、本論文では、デバイス設計、伝送品質評価、送信電力最適化などの観点から多帯域光ネットワークの最近の進展を概説している。また、光スイッチ技術や光ノード構成、経路提供、ネットワーク分析における進展と、全国規模での展開に向けた研究の進捗が紹介されており、資料的価値も高い。以上の理由から、Best Tutorial Paper Award としてふさわしいと判断した。

4 ComEX

IEICE Communications Express (ComEX) における Best Letter Award の選出は今回で 12 回目である。2023 年 10 月 1 日～2024 年 9 月 30 日の間に早期公開で掲載されたレターを対象に選定を行った。

レター賞選定にあたっては、査読時に査読委員や編集委員によって推薦されたものに加え、正員並びに編集委員から推薦を募った。ComEX がカバーする技術分野の中から、UAV 基地局、近距離 MIMO 伝送、OAM、UAV による位置推定、ドローン飛行のための光による位置推定、光給電、ミリ波 V2I などに関する優れたレターが候補として挙げられた。審査査読の結果に基づき ComEX 編集委員会にて慎重に議論し、受賞候補 1 編、次点 1 編を選定した。通信ソサイエティ編集会議での審議を経て、以下のレター 1 編が ComEX Best Letter Award に選定された。

■ ComEX Best Letter Award

“Unmanned Aerial Vehicle-based Virtual Array Channel Sounding System in 4.8 GHz Band”

Kentaro Saito, Sora Kojima

vol. 14, no. 2, pp. 39-42, Feb. 2025.

推薦理由: 本レターは、UAV (無人航空機) をベースとした仮想アレーチャネルサウンディングシステムを提案している。このシステムは、4.8 GHz 帯での電波伝搬特性評価を目的とし、UAV 搭載受信機で連続的

にチャネルデータを測定し、オフラインでデータを処理することにより、仮想的な大規模アレーアンテナを形成している。実験を通して、提案システムの有効性が検証されており、特に直接波の方位角と距離の推定誤差が小さいことが実験的に示されている点で信頼性と有効性が高い内容となっている。UAV を用いた電波伝搬測定における新しいアプローチを提案しており、今後の 5G システムや次世代モバイル通信システムの研究開発に貢献することが期待される。以上のことから、研究の新規性、有効性、信頼性が十分に認められるため、ComEX Best Letter Award にふさわしいレターであると判断した。

ComEX の掲載レターはオープンアクセスであり、2023 年からインパクトファクターも付与されている。また、2023 年 6 月以降に投稿されたレターは IEEE Xplore でも公開されている。受賞レターや早期公開レターを含め自由に閲覧できるので、この機会に是非下記 URL へアクセスして閲覧、並びに投稿して頂きたい。

https://www.ieice.org/cs_r/eng/comex/for_authors.html

<https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=10250155>

5 和文マガジン

マガジン論文賞は和文マガジン誌に掲載された「論文」が対象となる。和文マガジン誌は、読者層として現場の技術者や学生などを主なターゲットとする本ソサイエティの機関誌の一つであり、論文を含むバラエティに富んだカテゴリーの記事を掲載している。和文マガジン誌に掲載する「論文」は、そのターゲット層を踏まえ、基礎技術の解説や応用技術の紹介を含む解説論文を主体としている。そのため、掲載にあたってはターゲット層での理解が容易であること、及び、技術の応用・適用範囲に関する知見の提供など読者にとって有益な内容であること、を重視している。例年、この 2 点を含む以下の 4 点を評価基準としてマガジン論文賞の選定を行っている。

- (1) オリジナリティ: 対象や分類、主張が独創的であるか、あるいは新しい観点を含んだ解説であるか
- (2) 有効性: マガジン誌読者に有益な情報を提供しているか
- (3) 信頼性: 論旨が通っており、また、参考文献等が適切であるか
- (4) 了解性: 若手及び専門外の読者にとって理解が容易であるか

今年度は第 67 号 (2023 年 12 月) から第 70 号 (2024 年 9 月) までに掲載された論文を対象として和文マガジン編集委員会による評価・議論を実施し、最終的な受

賞論文を決定した。

■ マガジン論文賞

「メタバースと Web3, NFT (非代替性トークン), DAO (分散型自律組織) のリアリティ」

齊藤賢爾, 内田晃秀

2023冬号, No. 67, pp. 219-229, Dec. 2023.

推薦理由: メタバース, Web3, NFT, DAO などについて、歴史も含めて説明している。特にメタバースと Web3, NFT の関係性は、ゲームなどの経緯も含めて丁寧に解説しており、一見無関係と思われるものがどうして関連を持つとされるようになったかを理解できる。過去の事例や文献を多く紹介しており資料性が高いとともに、著者の見解の提示や問題提起などもあり読み応えがある。

以上のように、オリジナリティ、信頼性、有効性、了解性の観点からマガジン論文賞にふさわしいと判断した。

6 マガジン賞

2017 年度から、通信ソサイエティ (以下、通ソ) が授与する賞として「通信ソサイエティマガジン賞」(以下、マガジン賞) を創設している。

本和文マガジンは読者層として現場の技術者や学生、若手研究者を主なターゲットと想定している。このため、通ソ論文賞の対象となる“論文” 以外のカテゴリーの記事が多数掲載されている。これらの記事は、和文マガジンが想定している読者層に対する情報・知見の提供という観点では、論文に劣らぬ価値のあるものである。

和文マガジンにおいては論文以外の記事も重要な誌面構成要素であり、このような記事を対象とした賞を設

定することにより、執筆者のモチベーション向上や和文マガジンの活性化が望める。

このような状況を考慮し、通ソ論文賞と同等レベルで賞金授与を伴う「マガジン賞」を、通ソ論文賞である「マガジン論文賞」とは別に実施している。なお、マガジン論文賞とマガジン賞は同一記事に対して重複授与はされない。

マガジン賞は以下の3点に基づき選定を行った。

- (1) 文章の読みやすさ (了解性)
- (2) 内容の分かりやすさ (難易度)
- (3) 若手研究者・技術者、現場の技術員等にとって有効な情報 (有益性)

8 回目となる今年度のマガジン賞の対象記事は第 67 号 (2023 年 12 月) から第 70 号 (2024 年 9 月) までに掲載された記事であり、これらの記事に対して2段階の審査を行い、最終的に和文マガジン編集委員会における議論により受賞記事を決定した。

■ マガジン賞

「アンテナ・伝搬研究者の角度から見るメタサーフェスとその向かう先」

村田健太郎, 村上靖宜, 久世竜司

2024秋号, No. 70, pp. 172-189, Sept. 2024.

推薦理由: 近年注目が集まっているメタサーフェスについて、入門的な内容から専門性の高い内容まで網羅的に解説が行われていることや、単なる技術紹介にとどまらずに、活用面に関する問題点についても現状と今後の展望が的確にまとめられており、関連分野以外の読者にとっても有益な内容である。

また、読者の技術レベルに応じて必要な情報を読み解くことができ、了解性や難易度の点からも優れていることから、マガジン賞としてふさわしいと判断した。

研究会のたのしみ

通信ソサイエティ副会長 岡田 啓
Hiraku Okada

皆さん、B-plus 秋号はいかがでしたでしょうか？ 面白い記事はありましたでしょうか？ さて、私はお役目として研究会の運営を取りまとめることをしています。研究会には参加したことがありますでしょうか？ 皆さんに研究会について知って頂きたく、記事を執筆させて頂きました。

〔研究会とは〕

研究会では大学の教員、学生、企業の方など、様々な人が集まって、研究内容の発表を行い、皆さんで議論します。現在、通信ソサイエティには 26 の研究会があり、通信に関する多岐にわたる分野を取り扱っています。各研究会ではそれぞれ取り扱っている研究分野があり、自分の研究内容に合わせて参加する研究会を選ぶことができます。また、研究会はあちこちで開催されています。東京はもちろん、北海道や沖縄など、人気のある開催地もあります。離島で行われるなんてこともあります。更に、海外で開催されることもあり、開催場所に参加する研究会を決める人もいます。

また、幅広い分野を取り扱う分野横断型研究会もあります。現在、超知性ネットワークング、革新的無線通信技術、サイバーライフラインに関する三つの研究会があります。それぞれ扱うテーマの下、通信ソサイエティの研究会はもちろん、ほかのソサイエティといった垣根を越えた研究会を開催しています。

研究会にもよりますが、一般的には研究会で発表するためには 6 ページ程度の原稿を作成します。研究会を主催する研究専門委員会の推薦論文制度というのがあり、優れた研究内容に対して論文誌への投稿を推薦されることがあります。発表時間は質疑込みで 20 ～ 25 分程度であり、研究内容を詳しく説明することができ、聴講者からたくさんの質問やコメントを頂くことができます。ポスターセッションが開催される場合もあり、ほかの研究者と一人対数人で熱い議論を交わすこともできます。優れた発表を行った講演者に対して、表彰を行っている研究会もあります。昨年度から研究会で発表した若手研究奨励賞が始まりました。この機会に受賞を目指してみたいかがでしょうか。

〔研究会の古き良き思い出〕

私の初めての研究会は今からおよそ「? 十年前」にな

ってしまいます。昔過ぎて覚えていない、というのが正直なところなのですが、恐らく私のことですので、緊張しまくっていたかと思います。当時はまだプロジェクタなど便利なものではなく、OHP（若い人に伝わるのでしょうか？）を、しかも黒色のみで作成して、ペンで色を付けるという時代でした。原稿は TeX で書き、グラフは gnuplot、図は Tgif という懐かしのツールを使っていました。いまだに Tgif は、そのシンプルさゆえに時々使っています。

実は、発表で一番印象に残っているのは、研究会ではなく大会で、無線通信方式のセッションで発表したのですが、その当時は移動体通信の研究・開発がものすごく盛んで、つたない学生に 100 人を超える聴講者がいたのを覚えています。企業の方から「実用化は？」といった質問を受け、「学生にそんなこと聞くなよ」と心の中では思っていました。何とか（ごまかして）回答しました。学生のうちから、このような貴重な経験ができるのも、学会の良いところです。

〔最近の研究会への思い〕

今は立場も変わって、教員として学生に帯同して研究会に参加することが多くなりました。学生の発表を見ているのも別の意味で緊張しますが、皆さん、頑張っている姿を見て、私も初々しい気持ちが湧いてきます。学生には発表はもちろんのこと、ほかの大学の学生との交流も大事にしてほしいと思っています。同じ分野で学んだ者として、この先、どこでつながりがあるか分かりません。

ちなみに、私ですが、ほかの大学の先生や企業の方との交流（飲み会？）を楽しみに学会に行っている面もあります。飲み過ぎて、いろいろとやらかすこともありますが、横のつながりを作ることはいろいろと刺激にもなり、また研究に（雑用に）頑張ろう！ という気力が芽生えます。研究会をきっかけに、人と人のつながりを作ってみてはいかがでしょうか。

〔むすび〕

まじめな話から取り留めのない話まで、雑多なことを書いてしまいました。でも、研究会がどんなものなのか、少しでも知って頂けたでしょうか？ これを機会に、研究会に参加してみよう！ という方が増えることを希望的に期待しています。

NEXT ISSUE

2025 年冬号（第 75 号）2025 年 12 月 1 日発行

小特集 DX 時代に求められる セキュリティ課題と対策

子どもに教えたい通信のしくみ：ジュニア会員向けページ
量子コンピュータ

私の研究者歴：大橋正良
若者よ，世界に出よう！：サンタさんのいる国への留学
街 plus 探訪：歴史とにぎわいが混在する街「福岡」
技術と制度のおはなし：総務省におけるサイバーセキュリティに係る取組みについて

……他，御期待下さい

Editors Note

カーボンニュートラルと分散電源と次世代エネルギーの特集です。日本の得意分野になってほしい分野の記事です。「開発物語」からは，コンペに挑む大学生の情熱を感じることができます。「こんなツール，使っています」は，非常にニーズが高い GPU を使った PyTorch の解説です。「街 plus 探訪」では，伊勢神宮をはじめとする三重の魅力を知ることができます。至高の記事を御堪能下さい。（S.Y.）

エネルギーの有効利用に関する技術の発展に期待しております。私は本号の編集で卒業です。大変お世話になりました。（D.U.）

執筆者含めて関係者の皆様にはお忙しいところ御対応頂き，心から感謝申し上げます。読者の皆様に少しでも興味を持って頂ければ幸いです。（T.N.）



2025 年秋号（第 74 号）
2025 年 9 月 1 日 発行

EDITORIAL COMMITTEE

編集委員長 山口実靖

編集副委員長 山本 嶺 橘 拓至

編集委員

飯田大輔	伊藤敬義	伊藤暢彦	上野貴弘
金友 大	木下雅之	古川剛志	小南大智
櫻井利昭	沢田健介	立神光洋	道後千尋
中西孝行	中野雄介	中村光貴	長谷川直輝
羽多野一磨	早馬道也	東野武史	干川尚人
松田一孝	松室亮之	水野 修	山下泰輝

本誌の愛称は「B-plus」，正式名称は「通信ソサイエティマガジン」，「IEICE Communications Society Magazine」です。本誌掲載論文を文献引用する際は，邦文略称「信学通誌」，英文略称「IEICE Commun. Mag.」を用いて下さい。

通信ソサイエティマガジン B-plus へのお問い合わせ

- ☐ ご意見，ご要望：b-plus@ieice.org
- ☐ ホームページ ▶ <https://www.ieice.org/~cs-edit/magazine/index.html>
- ☐ B-plus 冊子体購入のお申込みはこちら ▶ https://www.ieice.org/~cs-edit/magazine/order_y.html.utf8

複写される方へ

一般社団法人電子情報通信学会は，本誌に掲載された著作物の複写複製に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。複写複製を御希望の方は，一般社団法人学術著作権協会（<https://www.jaacc.org>）が提供している複製利用許諾システムを通じて申請して下さい。

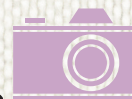
なお，複写以外の許諾（著作物の転載，翻訳等）に関しては，委託しておりませんので，直接本会へお問い合わせ下さい。

〈問合せ先〉 一般社団法人電子情報通信学会
TEL (03) 3433-6691 FAX (03) 3433-6659
著作物利用許諾申請： <https://www.ieice.org/jpn/copyright/tensai.html>

発行人／白石 智
発行所／一般社団法人 電子情報通信学会 通信ソサイエティ
〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館
Tel：03-3433-6691（代表） 振替：00120-0-35300
制 作／株式会社 太平印刷社
東京都品川区東品川 1-6-16

© Copyright 2025 IEICE. All rights reserved.

74
The photograph,
Communication can be seen.



通信がみえる一枚の写真

国際電信発祥の地跡

関屋大雄（正員：フェロー）



長崎のグラバー園の麓、長崎ちゃんぽん発祥の店として知られる「四海樓」の向かいに、写真の石碑がひっそりとたたずんでいます。

日本で初めて国際海底電信線が敷設され、上海とウラジオストクを結んだのは1871年、ここ長崎でした。国内（東京－長崎間）の電信線が開通したのが翌1872年であることを考えると、長崎が先に海外とつ

ながっていたのは、いかに国際色豊かな町であったかを物語っています。

岩倉使節団が海外から電信を送った際、長崎までは1日で届いたにもかかわらず、東京に到達するまでに更に10日を要したという逸話は、当時の通信事情と長崎の国際的な役割をよく示しています。



写真を募集致します

マガジン編集委員会では、「通信がみえる一枚の写真」をテーマに写真（電子ファイル（jpeg）あるいはプリント）、タイトル、説明文（約300字）を募集致します。

送り先：

【郵 送】〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館内 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン担当

【メール】b-plus@ieice.org までお送り下さい。

IEICE Trans. Commun. & ComEX



in



IEEE Xplore

“OPEN ACCESS”
是非、ご投稿を！