

iPERC2020

—令和二年度活動報告—
学外公開版

国立大学法人 電気通信大学
i-パワードエネルギー・システム研究センター



目次

1	ご挨拶	1
2	主要研究成果	3
2.1	分散型エネルギーシステムを主軸に据えたシステムレジリエンス、電池寿命予測、信頼性・安全性の理論と応用に関する研究(横川 慎二教授)	3
2.2	AIを用いた先進エネルギーデバイスの逆設計とエネルギーシステムの最適化 (曾我部 東馬准教授)	24
2.3	ペロブスカイト太陽電池の高効率化、高耐久化に関する研究 (早瀬 修二特任教授)	33
2.4	溶融塩炉フリーズプラグに関する研究 (大川 富雄教授)	42
2.5	再生可能エネルギー・ソリューションプラットフォームの研究 (市川 晴久特任教授)	45
2.6	インフラ制御システムのセキュリティ機能開発の研究 (澤田 賢治准教授)	54
2.7	COVID-19の感染拡大防止における換気とエネルギー消費に関する取組 (横川 慎二教授)	70
3	活動一覧	78
3.1	外部発表	
3.2	知的財産	
3.3	産学官連携実績	
3.4	競争的資金	
3.5	主な共同研究・受託研究・科研テーマ一覧	
3.6	主な教育	
3.7	表彰	
4	外部発表一覧	82
4.1	一般論文	
4.2	国際会議プロシーディングス等	
4.3	国内会議・学会口頭発表等	
4.4	著書	
4.5	解説記事	
4.6	招待講演	

1. ご挨拶

センター長 大川 富雄

i-パワーエネルギー・システム研究センター (Info-Powered Energy System Research Center、通称 iPERC) は、電気通信の観点からエネルギー技術に関する研究を推進することを目的として、2015年1月に設立されました。市川晴久教授(2015年1月～2017年3月)と新誠一教授(2017年4月～2018年3月)の後を受けて、2018年4月より2021年3月まで、私がiPERCのセンター長を務めました。

iPERCでは、専任教員である、市川晴久特任教授、横川慎二教授、曾我部東馬准教授、澤田賢治准教授を中心に、協力教員と客員教員を加えて、エネルギーマネジメントシステムの開発、量子物理・エネルギー学・人工知能の融合、デバイス・システムの信頼性向上、電子制御システムの安全性・高機能化・セキュリティ強化等に関する最先端の研究開発を推進して参りました。2019年度には、さらに太陽電池・熱電素子研究の第一人者である早瀬修二先生を特任教授に迎えて、エネルギー創生・変換分野を強化しました。

2019年には、2015～2019年の5年間の活動を総括すべく、柏木孝夫先生、池田雅夫先生、渡辺研司先生、芹澤善積様、高木真人様を評価委員にお迎えして、中間評価を実施しました。この結果、省エネ、活エネ、制御系セキュリティ、蓄エネ、創エネなど、iPERCで研究開発を実施している各々の技術分野における実績と、これらを統合してより効果的な成果を得ようとする試みについて、高い評価を得ることができました。一方で、国際連携の観点では、特に自然エネルギー先進国である欧州等との連携を進めるべきと考えられること、大学の使命としての研究活動を継続させつつ、これと並行して、産官学で連携しつつ社会実装に向けた取組みをより強化すべきとの見解が示されました。

2020年は、中間評価で得られたご意見を反映して、新たな第一歩を踏み出す重要な年となりました。個々の研究活動を充実させるのと並行して、iPERCメンバーが一致団結するとともに地域連携等も絡めて個々の活動を有機的に結合し、ソリューション研究の観点でより有意義な成果を得つつあります。本冊子では、2020年度にiPERCで実施した活動を報告致します。読者の皆様におかれましては、ぜひiPERCの活動をご理解いただき、ご支援いただければ幸いに存じます。なお、2021年度より、iPERCの活動を牽引してこられた横川慎二教授にセンター長をバトンタッチ致しました。私自身も、iPERCのますますの発展を祈念しております。

2020 年度

【iPERC 運営委員】

センター長・教授	大川 富雄	機械知能システム学専攻
理事	小花 貞夫	
理事	阿部 浩二	
理事	植村 隆	
特任教授	桐本 哲郎	産学官連携センター副センター長・機械知能システム学専攻
教授	石橋 孝一郎	情報・ネットワーク工学専攻
教授	崎山 一男	情報学専攻
教授	金子 修	機械知能システム学専攻
教授	山口 浩一	基盤理工学専攻
教授（専任）	横川 慎二	情報学専攻兼務
准教授（専任）	澤田 賢治	機械知能システム学専攻兼務
准教授（専任）	曾我部 東馬	基盤理工学専攻兼務
特任教授（専任）	市川 晴久	
特任教授（専任）	早瀬 修二	
	森倉 晋	URA

【協力教員】

教授	沈 青	基盤理工学専攻
准教授	木寺 正平	情報・ネットワーク工学専攻
准教授	小木曾 公尚	機械知能システム学専攻
助教	坂本 克好	基盤理工学専攻

【客員教員】

石王 治之	石王治之技術事務所 代表
Abdul Waris	バンドン工科大学 教授
谷口 彬雄	信州大学 名誉教授
川喜田 佑介	神奈川工科大学 准教授
松崎 和賢	中央大学 准教授

【特任研究員】

Muhammad Akmal Kamarudin	i-パワードエネルギー・システム研究センター
Baranwal Ajay Kumarand	i-パワードエネルギー・システム研究センター

2.主要研究成果

2.1 分散型エネルギーシステムを主軸に据えたシステムレジリエンス、電池寿命予測、信頼性・安全性の理論と応用に関する研究

横川 慎二 教授

情報理工学域 I 類/総合情報学科/情報学専攻 経営・社会情報学プログラム 兼務

分散型エネルギーシステムを主軸に据えたシステムレジリエンス、電池寿命予測、信頼性・安全性の理論と応用に関する研究を行なっている。2020 年度には、以下の点について研究を推進した。

- ① 2050 年カーボンニュートラルを達成する自律分散エネルギーインフラの基本概念の設計と中期課題の検討
- ② 機械学習・深層学習を用いたエネルギー設備の劣化予測と、新技術・新製品開発への応用。
- ③ IoT センシングを用いた環境品質の評価とエネルギー消費の分析手法開発。

1. 2050 年カーボンニュートラルを達成する自律分散エネルギーインフラの基本概念の設計と中期課題の検討

1.1. 2050 年の社会像に向けたエネルギーインフラの要求事項

我々はこれまでに、インターネット情報通信網に通信事業の主役の座を譲った電信電話事業、生産量世界一を誇ったロジック、メモリなど半導体製造分野の低迷、世界最大の登録者数を達成した携帯電話における IP 接続サービスの新規受付終了など、「かつて」我が国が世界に冠たる分野だった領域が他国の後塵を拝する姿に、何度も直面してきた。

それらの革新的なハードウェア技術と先進的なソフトウェア技術の上に確立された我が国の競争力を支えるプラットフォームとしてのサービスや品質は、その魅力的品質によって大きくシェアを獲得することに成功してきた。ところが、技術の革新やグローバル化による需要の変化に面してそれらが当たり前品質へと移行し、やがては競争力を失うようなことが繰り返されている。

このような変化に適応しうる破壊的イノベーションの創出を目指す際には、同じ轍を踏まぬ仕掛けが不可欠である。いいかえれば、昨今ビッグ・テックの築いたエコシステムには、いずれも技術とサービスを革新し続けることによって魅力的品質を獲得し続けるプロトコルが整備されている。例えば、Amazon の構築したクラウドコンピューティングのプラットフォームは、人工知能ベースのスマートスピーカーや IoT ネットワークの基盤として、サービスおよびそれ自身が新陳代謝しながら持続的に成長可能な基本設計がなされている。またそれらのリソースは、情報通信の届く限り需要と経済のレベルに合わせた形で利用できる。いいかえれば、デバイスレベルやシステムレベルの革新だけでは持続性に欠けるため、リソースの消費を繰り返すことを余儀なくされてしまう。

また成功した破壊的イノベーションは、事業者が全ての構造を決定するものではなく、中間層であるインフラの部分を確認し、上下の基幹技術とユーザエクスペリエンスの層には自由度を持たせてオープン開発する土壌を作り上げる、ワイングラス型の層構造を持っている。2050 年に実現すべき社会像を開発・設計してゆくには、この中間層インフラとなるプラットフォームの実現が不可欠である。

iPERC では、小型蓄電池群の統合システムとして、科研費・挑戦的研究（開拓）「協調給電による再生

可能エネルギー指向自律分散グリッドの開発と実証」(17H06293, 2017-2020, 代表: 横川慎二)において, USB-PD (Power Delivery) をインターフェイスとした 100W 系の協調給電システムであるバーチャルグリッドを提唱し, 研究開発してきた (e.g. Ichikawa, Yokogawa, et al., IEEE Smart Grid Comm. 2019). これまでの研究において, 小型蓄電池の統合による協調給電の機能検証や, 負荷を含むグルーピング最適化の理論構築, 複数のエネルギー源がシステムに存在する際の不具合解析などを完了している.

そのような背景のもとで我々は, 2050 年までに温室効果ガス排出を実質ゼロ化するという我が国の大きな目標に向けて研究開発を進めるにあたり, 破壊的イノベーションの創出を支える社会基盤として, 構成要素としてのデバイスやシステムはもちろん, そこで実現されるサービスを組み合わせたり, 容易に入れ替えたりできる新陳代謝の機能を有することによって持続可能な技術となる「インターネット型電力プラットフォーム」を, グローバルなレベルでの成長領域を前提に確立することが肝要と考える.

1.2. 2050 年の社会像に向けたエネルギーインフラの要求事項

現在も発展し続けている科学技術を基盤とした生活様式を確保し, 真に持続可能な文明・文化を築いてゆくには, イノベーションを生み出すプラットフォームを構築する活動と, 温室効果ガスの排出量を限りなくゼロに近づける活動が, 「同じもの」である必要がある. 2050 年までに温室効果ガス排出を実質ゼロ化する目標に向けて, それを実現する社会プラットフォームがエネルギー消費に関する節制を強制的に伴うものである場合は, 文明・文化の発展を減速させるものにもなる. イノベーションを創出するにはそれに要するリソースの配分 (エネルギー投入) が必須であるため, 高リソース・高エネルギーな社会プラットフォームは, 同時に 2050 年の温室効果ガス排出ゼロを達成するためのものでなければ, 社会のエネルギーストレスは解決できない.

そこで我々は, 今後 100 年以上にわたって世界を支えてゆく次世代のエネルギーシステムの研究を進めるにあたり, 研究開発する技術に持続性を付与するには, プロファイル情報を付与してそれらと同化したエネルギー, すなわち Information-powered energy によってシステム構成要素の新陳代謝を可能とするインターネット型電力プラットフォームの創出が不可欠と考えた. 我々が考えるこのプラットフォームは多階層のものであり, ①エネルギーサービスを駆動させる上位のアプリケーション層と, ②太陽電池, 蓄電池, 地熱発電などの多用な再生可能エネルギー資源や天然資源発電を結びつける下位のエネルギーリンク層と, そして③上位と下位が技術的発展や社会的進展で新しいものに置き換わったとしても駆動を維持できるエネルギートランスポート層から構成される. すなわち, 主体となるのはワイングラスの中間層にあたる③エネルギートランスポート層とそのインターフェイスである. エネルギートランスポート層はエネルギーリンク層に繋がるエネルギー資源やデバイスの種類に関係無くアプリケーション層に繋げる役割をもち, さらに今後の技術的発展によってリンク層に繋がるデバイス数が膨大になっても十分に対応できるためのアドレス管理機能を有する必要がある.

この実現に向けて我々は, AI, 制御セキュリティ, IoT 環境センシングなど, 現時点では直接エネルギー分野の主流とは異なる専門分野において活躍する若手研究者を主軸とする研究センターを電気通信大学に設置し, 研究開発を行っている. また, センターには革新的太陽電池分野や, ユビキタスコンピュータネットワーク分野で大きな実績と貢献を果たしている研究者が活躍している. インターネットの起源である ARPANET (Advanced Research Projects Agency NETwork, 高等研究計画局ネットワーク) が, 国防の要として大学と研究機関によるプロジェクトにおいて開発されたように, Information-powered energy の研究は変革や災害に対してレジリエントなエネルギープラットフォームとして, 大学と研究機

関を中心として推進すべきである。さらに、特定の産業分野に依存せず、シェアリングを通じた共有から生まれる価値を基盤とした技術プラットフォームとして確立し、将来の不確実性への対処可能性の機能の付与と、現時点では存在していない新しい IoT ベースビジネスの創出にも貢献しうることが重要である。

ユーザが形成する小規模グリッド群が物理的および情報的ネットワークングによりエネルギーインフラになり得るとき、ユーザが持つ情報も社会を動かす大きな力となる。そこで、エネルギーと情報が不可分な関係となった社会を想定し、その基盤となる Energy Internet Protocol Suite (EIPS) の創出が、今後必要と考えられる。すなわち、革新的太陽電池や大容量化した蓄電池群が小規模かつ大量に身近な生活の中に配置されるようになることを踏まえ、それらを EIPS によって自在、かつ交換可能な形でネットワークングし、再生可能エネルギーを最大限に運用しうる制御とセキュリティを付与することにより、温室効果ガス排出ゼロ化と、レジリエントなエネルギーインフラが実現されると考えられる。

2050 年カーボンニュートラルに向けた一つの方策として、すでに提唱されてきたスマートグリッド構想が連想される。この構想は従来型のリソース提供型のプラットフォームを基盤としているため、個人はコミュニティに、コミュニティは社会に、社会は国際社会にという順に大きな存在にリソースが奪われる状況が生じてしまう。前述の高い目標を達成するための持続性を確保するには、リソースシェアの概念をプラットフォームに導入し、共有から生じる価値というインセンティブを生み出す仕組みがなければならない。

1.3. 2050 年の社会像とその中心となる科学技術

2050 年のエネルギーインフラは、イノベーション創出の原動力となると同時に温室効果ガス排出量実質ゼロを実現するために、ユーザ個人が自ら形成する小規模自律分散システムの相互共助を基盤としたものになると考える。これは、これからの社会が既に提案されているスマートグリッド構想などが描く現在の延長線上にある社会像とは本質的に異なり、ユーザが主体となって情報とエネルギーを共有することによって新たな価値の創造とレジリエントな社会生活を確保できる社会に変容してゆくことを意味している。

図 1 にスマートグリッドと本提案における「インターネット型電力プラットフォーム」の比較を示す。事業組織によって大小発電や需要を集中コントロールする従来のスマートグリッド構想は、電力の安定供給が主目的となり、保守・運営は事業組織に委ねられる。我々の提案は、ユーザ自らの手で形成された小規模自律分散グリッドのネットワークとリソースシェアにより、既存の基幹系統に代わるインフラを形成するという分散アプローチである。自ら構築した小規模自律分散グリッドをネットワークに接続することにより、ユーザが必要とするだけのエネルギーを共助により入手可能で、末端のシステムやデバイスがユーザの手で入れ替わることによって新陳代謝してゆくようなシステムである。

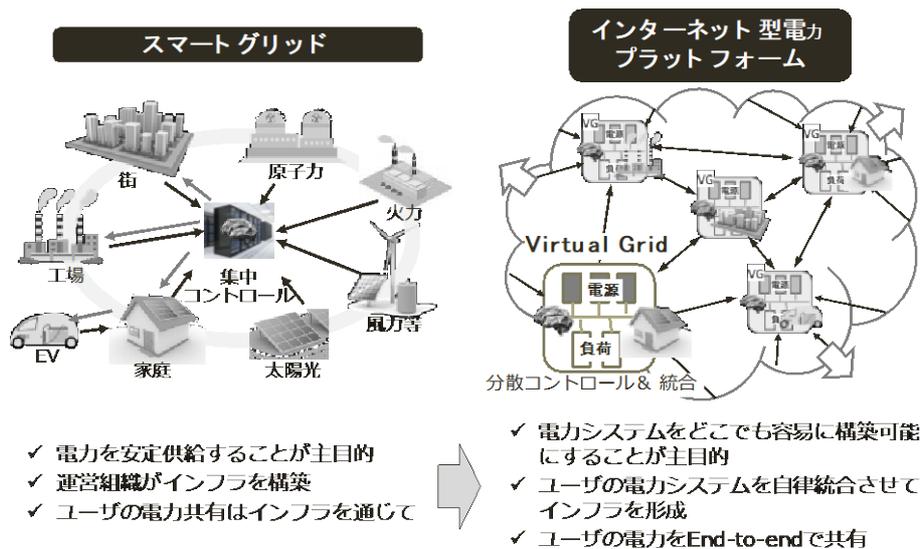


図1. スマートグリッドとインターネット型電力プラットフォームの比較.

2050年までには、革新的な太陽電池や大容量の蓄電池が身近に数多く導入されるようになり、生活や仕事に必要な分のエネルギーは遠隔地で造られたものを運んできて使う形から、身近にあるものを集めて利用することが主流になる。すでに研究開発が進んでいる高効率なタンデム型太陽電池や自由に形状を変えられるペロブスカイト太陽電池などが社会実装される形態は、航空機・自動車などの移動体の外装や建物の外壁・窓など、身の回りのあらゆる場所に及ぶとされている。かつて人が里山の薪を集めてエネルギーとしたように、生活に十分なエネルギーを身の回りから集めて蓄積することが出来れば、地産地消を基本とした生活様式も不可能ではなくなっているであろう。このとき、近隣で物理的にそのエネルギーを貸し借りすることによって、相互の過不足を補い合うことも可能となるものと思われる。

このようなエコシステムは、自然から取り出されたエネルギーが情報のタグ付けがなされて Information-powered energy に昇華されることによって、グローバルなレベルのインフラになりうる。すなわち、いつ、どこで、だれによって、どのようなエネルギーが、どのくらい、どうやって収集、蓄積できるのかを情報技術によって共有することによって、物理的な接続だけではなく、仮想的にも接続されたエネルギーネットワークとして構築される。下位のエネルギーリンク層において超伝導技術などの長距離送配電技術が実現するような場合でも、再生可能エネルギーによる地産地消の局所的グリッドと長距離送配電による広域基幹グリッドの階層構造を自由度高く構成し、要素となるデバイスやシステムの組み合わせを変えながらシステムが進化していくことは必至と考えられる。その進化のためには、我々の考えるインターネット型電力プラットフォームのような仕組みが必要となる。

さらに、システムの変遷に伴って、事業会社に準備された供給網にぶら下がる現在の送配電ビジネスとは異なる、地産地消の自由度を最大限に生かした生活様式やビジネスモデルが創出されるようになるであろう。例えば、オフィスや店舗を新しく出店する際には、EIPSを実装した創電デバイスと蓄電デバイスを必要となる電力分準備し、ネットワークに物理的、電子的に接続することにより、電気工事することなくエネルギーが得られるようになる。消費量が多くなって不足が見込まれるときには、物理的に繋がっている近隣から借用する、蓄電池を物理的に配達してもらうなどして対処がなされる。このように、送電線やコンセントから自由になることにより、場所や期間を気にせずにビジネスの基盤を構築し、新しいアイデアを迅速に試行錯誤することが可能になる。

1.4. 想定する社会像のグローバルな成長

また、エコシステムの普及は先進国よりも新興国において急速に進む可能性が高い。実際に、バングラデッシュ、ルワンダ、インドなどの未電化地域では、太陽光パネルと鉛蓄電池による簡易なシステムを使って生活を営む姿が数多くみられる。これが EIPS を実装したシステムに置き換わることにより、巨額の投資を必要とせずユーザ主導によって電力インフラの整備が進んでいく。このシステムはネットワークに接続した状態でも独立でも機能するため、一時的な寸断にも耐性がある。また、革新的なワイヤレス給電技術や、大容量蓄電池による電力の物理ロジスティクスなどが発達した際には、送電線に依存しない電力ネットワークが形成され、我が国だけでなくいずれの国においても「電線のない空」を取り戻すことが期待される。

1.5. 対災害レジリエンス向上としての位置付け

一方、我が国のような災害大国においては、このシステムがライフラインの寸断された現場で活躍することが期待される。我々は、1995年の阪神・淡路大震災、2011年の東日本大震災、2016年の熊本地震などの巨大地震において、既存の電力網が損なわれる事態に数多く直面してきた。その際の迅速なライフラインの復旧は、被災者の生活や地域産業の迅速な回復のための喫緊の課題であった。今後発生が予測されている南海トラフ巨大地震の発生時には、250万棟の全壊・消失や2557万棟への停電が発生する可能性があると思われ、その傾向はさらに強くなることは必至である。このような大規模の災害に備え、システムのレジリエンスを高めておくためには、ユーザ自らの手で復旧された小規模自律分散グリッドをネットワーク化し、リソースシェアをしながらインフラを形成する本提案の方式が、いち早い復興のために有利である。今後も起こりうる大災害への備えとして、インターネット型電力プラットフォームに移行してゆくことが、我が国の持続的発展のためにも極めて重要と考える。

1.6. 今後の経済発展における役割

これからの社会は、働く「場所」の分散化も進むことは必至である。その際には、消費される情報・エネルギーなどの上で一人一人の個人が能力を発揮し、それらのネットワークキングによって大きな価値が形成されてゆくような経済活動に移行してゆくものと思われる。この経済活動においては、個人の活動に対して必要な情報とエネルギーをパッケージにして提供するようなスタイルが有効である。

この数十年間、主な情報通信ビジネスモデルは、キーテクノロジーの登場によって姿を変えてきた。同様な変化が、情報とエネルギーとの融合によって生じると考えられる。図2に示すように、クラウドの出現によってキャリアビジネスがOTT (Over The Top) ビジネスに変容し、最近では情報提供の主体が変わってきている。同様に、インターネット型電力プラットフォームの実現によって、サービスとそれを実現するための Information-powered energy がセットになって提供されるサイバー・物理システム(Cyber-Physical System; CPS)基盤のビジネスが将来の主役の座につくものとする。このようなビジネスモデルへの転換は、エネルギー単体での経済的価値はもはや存在せず、CPS 基盤の上で実現される価値がマネタイズされる経済活動に変遷すると考えられる。その際には、現在のインターネットにおける「インターネット代金(ネットワーク料、サービス料、サーバメンテナンス料)は結局誰に渡っているのか」という課題と同じように「電気代は誰に払っているのか」という課題が示されるようになるだろう。すなわち、このコストを社会的活動の価値と共助で充足してゆくような経済システムが求められる。

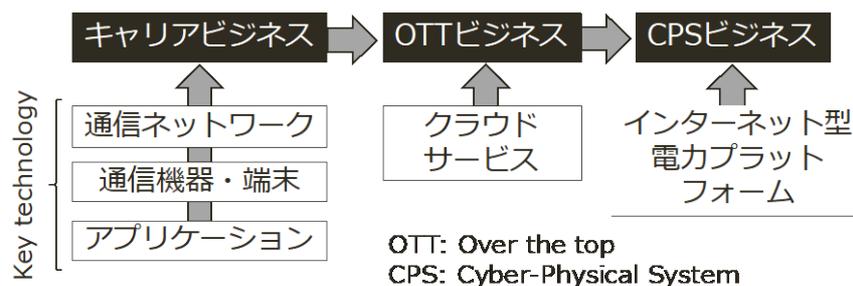


図 2. ビジネススタイルの変遷を支えるキーテクノロジーの概念図.

インターネット型電力プラットフォームは、イノベーションとしての CPS ビジネスを生み出すプラットフォームであると同時に、再生可能エネルギーに指向して温室効果ガスの排出量を限りなくゼロに近づけるための枠組みである。この技術の研究開発にいち早く取り組み、その確立と発展のイニシアチブをとった国家、組織こそが、2050 年におけるビッグ・テックのポジションをとるものと考えられる。

1.7. インターネット型電力プラットフォーム研究の意義

ここまで述べた社会像は、温室効果ガス排出量をゼロ化するという喫緊の目標と社会の経済的な発展という、これまでの人類の歩みの中では対立する二つの概念が、一つのエネルギーネットワーク技術によって、同じものとして同時に実現されるというものである。

これまで中央集権的に構築、運用、進化してきたエネルギーネットワークを、ユーザ主体の自律分散システムネットワークに根底から変えるという目標は、実現した際には組織や個人による様々なビジネスを生む土壌となる。固定電話網が携帯電話に、さらにスマートフォンにとって代わられたように、電気料金ではなくモビリティや得られるサービスによって、エネルギーインフラに価値転換をはかるものである。

提案する技術は、始めに災害からの早期復興、無電化地帯への電力供給という、新興国と我が国のそれぞれの事情によって導入、普及がなされるものと考えられる。しかし、その大きな目標が温室効果ガスのゼロ化であることと、イノベーションを産むプラットフォームであることを並立するものであることから、やがてその価値は同じものに収束してゆくものである。

インターネット型電力プラットフォームの実現には、エネルギーを自然界から取り出す創エネルギーと、それを蓄積する蓄エネルギー、それらをどのように活用するかという活エネルギーの要素が必要となる。すなわち、我が国が国際競争力を持つ創電デバイス工学の分野、革新的蓄電池工学の分野、それらを統合して制御する情報通信工学分野と制御工学分野の協業が必須である。また、そのシステムを運用する経済システムの設計や、信頼性・安全性・レジリエンスの確保は、新たなインフラを構築するための必須事項である。それらの上に実現されるサービスは、社会システムとしての側面と同時に、公共システムとしての側面も有する。したがって、公共政策学、倫理学などによる制度研究・設計などの領域をも活性化するものである。

また、どこにいても自由にエネルギーを利用できる社会では、場所やタイミングの制約を受けることなく様々なサービスを実現することができる。例えば、現在の GIGA スクール構想における、現場の電源供給問題に対するサービスがある。現在、一人一台の端末環境や、ネットワークの整備などが議論されているものの、現場の電源環境に関する議論は進んでいるとはいえない。視聴覚室などの特殊な環境を除いて、一般の教室においてはコンセントが高々 2 箇所程度しか整備されていない。このような環境においても、本提案のインターネット型電力プラットフォームを用いて局所グリッドを構築することによっ

て、それぞれの端末に対して必要な電力を計画的に供給し、第一の目的である教育の機会均等を確保することができる。さらに、それぞれの学校に備えられている太陽光パネルや蓄電池などの再生可能エネルギーによる電力設備を、平時から有効に活用して非常時に備える仕組みを取り入れることによって、再生可能エネルギーへの指向と地域のレジリエンス能力を向上することも可能となる。このように、情報通信とエネルギー供給をパッケージ化して提供する仕組みによって、場所やタイミングの制約を受けずに、サービスを構築する土壌ができる。

また、送電線による給電から地産地消の再生可能エネルギー活用を中心にする枠組みは、最小限の物理的な配線接続のみでネットワークを形成するため、街の景観に大きな影響を及ぼす「電線」の本数を大きく低減することが可能になる。都市計画の自由度や災害による一時寸断からの回復だけでなく、電線のない空を取り戻すことへの心理的な期待感が高いと考える。

2. 機械学習・深層学習を用いたエネルギー設備の劣化予測と、新技術・新製品開発への応用 [8][10][11][13]

2.1. 2050年の社会像に向けたエネルギーインフラの要求事項

再生可能エネルギーを主力電源とする次世代電力インフラへのアプローチとして、我々は超小型電力システムを単位に随時、脱着して再構成可能なマイクログリッド方式を提案している。この方式は、制御単位の規模を新規需要に適合する小規模から構築するインターネット型の次世代電力インフラであり、効率的な再生可能エネルギーの利用を加速し、社会と産業を革新する機器・デバイスに適合する電力を供給し、災害や社会変化に対してレジリエントな電力インフラを構築することが期待される。

その具現としての Virtual Grid System (VGS) においては、機器・デバイス、太陽光発電装置、蓄電池などを自在に組み合わせてグリッドを形成し、分散しているユーザ電力を統合し、電力フローを動的に制御して最適に制御する、協調給電の機能を要件の一つとしている [5]。すなわち、リチウムイオン二次電池を主体とする蓄電設備や、次世代型太陽光発電素子などによる創電設備が、自律分散電源としてネットワーク化されたエネルギーマネジメント基盤となる。また、この基盤の上に共通の電力制御プロトコルと API を構成したプラットフォームが構築される。このプラットフォーム上では、運用条件や可動履歴の異なるエネルギー設備や接続されるデバイスの状態を、逐次監視しながら将来予測することが必要となる。

本講演では、VGS の基本機能としてのデバイス状態の逐次監視の機能について、接続された機種の種類と、蓄電池の劣化状態の診断に関する検討状況を紹介する。

2.2. 機器間認証を利用したデバイス識別の研究 [8]

随時、脱着して再構成を繰り返すマイクログリッド方式においては、供給と消費の両者が常に変動するため、中短期的にそれらの変動を予測して、最適な形に制御することが、安定的、かつレジリエントな運用のために求められる。その際の予測において重要となる情報の一つが、接続された機器の電力消費やバッテリー容量などに紐づけられる、機種や個体の個体情報である。

昨今、従来の USB 受給電方式と比べて高い受給電能力(100W)を有する USB PD (Power Delivery) プロトコルが注目されている。USB PD では、安全確保のため、受電側と給電側の機器間認証 (ネゴシエーション) が行われることが特徴の一つである。この USB PD を用いて提案されている VGS では、電力消

費量、供給可能量などのデバイス情報に基づいて協調給電を行うため、情報を如何に正確に取得するかが課題となる。従来の AC 給電方式においては、交流波形の特徴を利用した製品判定が提案されている。ところが、DC 給電である USB PD に存在しない特徴を用いる方法であるため、VGS への適用は難しい。一方で、VGS において最適な協調給電を実現するには、個々の機体レベルの判別を行うことが必要となる。さらに、デバイス及びその情報をセキュアに管理するためには、デバイス側へのソフトウェア導入を必要としない手法が望ましい。

USB PD に接続するデバイスの受給電波形に基づく推測によって、間接的にデバイス情報を取得する方法について検討した。計測した結果から受給電波形の特性を分析し、デバイスによって差異が見られる特徴に基づくものである。この特徴からデバイスの製品を判別する手法と、同一製品から特定の機体を判別する手法の検討を行った。

機械学習、深層学習の手法を用いた特徴抽出と個体識別の性能を評価するため、各種のデバイスについて、メディアロジック社製 DTW2U3 を用いて受電側の充電状態を変化させた受給電波形を複数回計測した(図3(a))。その際、受電側機器の使用条件による受給電波形への影響を一定にするため、アプリケーション等を起動しない状態で計測を行った。製品毎に電力波形が異なるのは、内部回路や BIOS が異なるためと考えられる。

次に、同一製品における個体間の異なる特徴を比較するため、同一機種 3 台のスマートフォンを用いて使用状態をそれぞれ変化させ、受給電波形を複数回計測した(図3(b))。内部回路が同じにも関わらず、わずかに受給電波形が異なる。これは使用状態や利用傾向など機体毎に異なる差異が関係するためと考えられる。

計測したデータを用いて、代表的な機械学習、深層学習の手法を用いて、個体識別の性能比較を実施した。識別手法の比較のため、4つの組み合わせ(①電力波形から予め定義した代表特性を抽出し、サポートベクターマシーン(Support Vector Machine; SVM)を用いる方法、②自動的に特徴を抽出可能な長短期記憶(Long-Short Term Memory; LSTM)を用いる方法、③時間領域情報を残して周波数特性を解析する連続ウェーブレット変換(Continuous Wavelet Transform; CWT)から出力される時系列データと LSTM を組み合わせる方法、④連続ウェーブレット変換を可視化した画像と畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network; CNN)を組み合わせる方法)による機械学習を用いた。

学習と評価の結果として、製品識別手法は LSTM を用いた識別、同一製品の特定の機体識別手法は CWT と CNN を組み合わせた識別のみが、識別精度 90%を超える結果となった。すなわち、製品毎の受給電波形のような大局的な波形の差異を識別には LSTM が有効である。逆に USB-PD ネゴシエーション直後の波形には大局的な特徴は少なく、CWT と CNN には適さなかったと推察される。一方、同一製品の機体毎の受給電波形は、大局的な差異が少ないため LSTM では認識できなかった。逆に、使用状態がネゴシエーション直後の波形に特徴を生み、CWT と CNN での機体認識が可能になったものと推察される。

これまでの実験は充電状態やアプリケーションの動作状態などを理想的な状態で行ったものであるが、実際の環境においては、製品の流通数、学習できる機体の分布が大きく異なるため、学習データセットに偏りが生じることが推察される。このような不均衡な学習データセットへの対策が課題である。

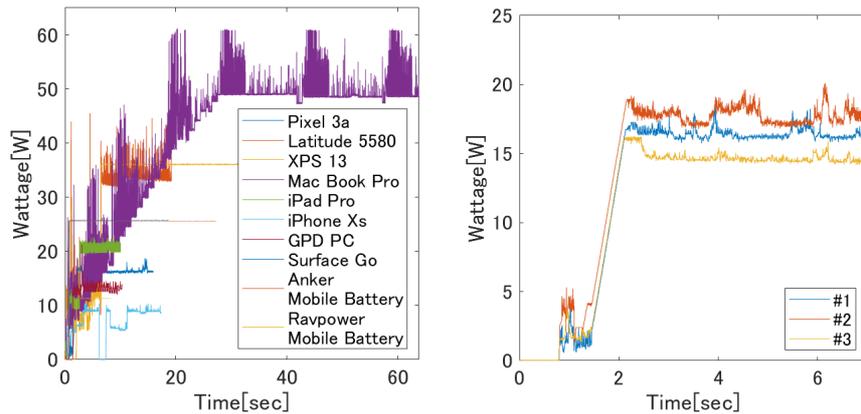


図 3. USB-PD の認証における電力波形の例.

2.3. 蓄電池の状態診断に関する研究[11][13]

蓄電池の状態診断はグリッドの安定性確保のために不可欠な技術要素となる。接続された蓄電池の劣化メカニズムを材料、構造の異なる電池に対して簡易に判定し、シミュレーションによって運用条件の影響を明らかにする方法論が必要となる。

モバイル機器や電気自動車、自律分散型エネルギーシステムの蓄電設備など、様々な環境や機器においてリチウムイオン二次電池(Lithium-ion Battery; LiB)が使用されている。これらの使用方法、使用環境は、LiB の容量劣化に異なる影響を与える。従来研究より、LiB の劣化メカニズムには、充放電を繰り返し行うことで進行するサイクル劣化と、ある程度充電した状態で保存している場合に進行するカレンダー劣化の二つがあることが知られている。各々の劣化メカニズムについては、従来研究による予測モデルが提案されており、一般にそれらの予測値の和より運用の劣化量が予測される。これらの現象はサイクル試験に基づく容量劣化を予測する統計モデルとして確認されたものであり、容量劣化の要因となる物理化学的メカニズム及び内部状態の変化との対応は、現在のところ不明である。

LiB 内部の物理化学的特性を調査する方法の一つに、電気化学インピーダンス法がある。周波数応答アナライザーを用いたインピーダンス測定の結果を、LiB を模した等価回路にあてはめて視覚的・数値的に分析し、バッテリーを分解することなく内部状態を把握する方法である。この手法を用いることにより、劣化に寄与する LiB 内部状態を診断することが可能となるが、一方で高額な測定器を必要とすることや、測定のために時間を要するなどの理由により、VGS への実装による即時の診断には不向きである。そこで、インピーダンス測定の結果に基づいて、充放電時の電圧、電流の変動値などを用いて劣化を診断する方法が必要となる。

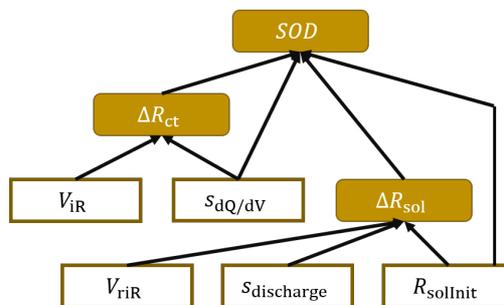


図 4. 階層ベイズモデルによる劣化診断の概念図.

階層ベイズモデルは、分布のパラメータを確率変量とみなし、その事前分布を導入した階層構造によって確率分布の分布を表現するものである。本研究では、マルコフ連鎖モンテカルロ法（以下、MCMC法）により、すべての未知パラメータをそれぞれの事後分布、もしくはその統計量として算出することにより、モデルの推定値を得る。電気化学インピーダンス法によって推測した劣化と内部状態の変化の関係と、充放電時の電圧、電流の変動値との関係より、図4に示すような階層ベイズモデルを仮定した。

充放電を繰り返すことで確認されるLiBの放電容量の劣化量（State Of Degradation; SOD）は、電気化学インピーダンス測定の結果から、電荷移動抵抗の変化量 ΔR_{ct} と溶液抵抗の変化量 ΔR_{sol} の増加に依存していると考えられる。さらに、それら二つの抵抗変化を導電開始時の電圧降下量 V_{iR} 、充電開始時の電圧上昇量 V_{riR} 、放電開始時の放電曲線の直線近似の傾き $s_{discharge}$ 、放電開始時の dQ/dV 曲線の傾き $s_{(dQ/dV)}$ 、容積抵抗初期値 $R_{solInit}$ によって表現する階層モデルである。すなわち、内部抵抗情報、充放電曲線情報の一部から個体間差を含んだ特徴を抽出することができ、それを用いて正確なSOD診断が行うことが可能になることを示している。また、LiBの初期状態、現在の充放電波形特性の2つの時点の情報のみから、現在の劣化量が診断可能であることを示している。

階層ベイズモデルによる劣化量診断結果と、実際に観測した容量劣化量を比較した結果を、図5に示す。図4のモデルについて、MCMC法で得られたパラメータの事後分布より、モデルパラメータのMED推定量（事後中央値；posterior median）を算出し、モデルに適用した結果である。実際の観察結果はLiBの個体間差の影響で有意な個体間変動がみられるが、階層ベイズモデルによる診断では、その個体間変動を含んだ推論が可能となっている。

この階層ベイズモデルで使用している変量は、セルの品質管理で得られる初期値や、充放電の際の電圧、電流測定から得られるものに限られる。そのため、VGSのHUBに測定機能を追加することで、実装可能と考えられる。

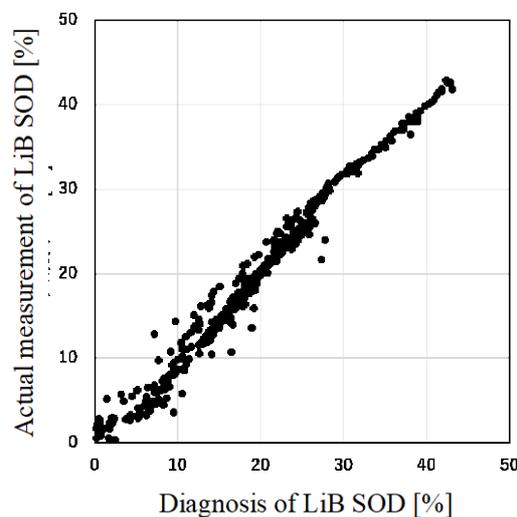


図5, LiB劣化量の実測値と予測値の2Dプロット。

2.4. ユーザーの利用調査データに基づくモバイル端末のバッテリー劣化傾向の診断[6]

高性能化、大容量化が進むリチウムイオン二次電池は、様々な機器・システムのモビリティ確保や、再生可能エネルギーの蓄電システムのために幅広く用いられている。一方で、その長寿命化が実現されると共に、資源の有効活用とゼロエミッションの実現のため、ユーザーや使用形式の変化を伴う二次利用が課題となる。一般的に、リチウムイオン二次電池の劣化はユーザーによる複雑な使用傾向に依存して

進行が一様ではないため、二次利用の基準となる内部蓄電池の劣化状態を把握すること、劣化を緩和させる使用方法を把握することが重要である。本研究では、スマートフォンの使用方法に関するアンケート調査分析よりユーザーの使用傾向を把握し、使用状況に関するデータのみに基づいて、リチウムイオン二次電池の劣化を診断する方法を検討する。900名のスマートフォンユーザーに対する利用方法のアンケートデータより、統計解析と因果推論の手法を用いて使用傾向の分類と劣化に寄与する使用傾向と劣化量の予測方法について検討、提案する。

スマートフォンを始めとするモバイルデバイスや電気自動車、家庭用蓄電池には、リチウムイオン二次電池(Lithium-ion secondary battery; LiB)が用いられ、様々な用途と場面で我々の生活の至るところに利用されてきている。特に、モビリティの確保や、再生可能エネルギーの活用促進による温室効果ガスの排出量の低減のために、車載・移動機用の蓄電池や定置型蓄電池など、長期に渡って高い信頼性が要求される分野におけるキーデバイスとしても採用されている。

一方で、LiBの長期使用においては、充放電や保管に伴う容量劣化が課題の一つである。特に、俗人性の高いスマートフォンなどモバイルデバイスに内蔵されるLiBに関しては、ユーザーの使用環境や使用頻度が一様ではないこと、デバイスによって容量や形状が多様であることから劣化の進行メカニズムが複雑となり、劣化の評価や予測は難しくなる。同様に、家庭用蓄電池や電気自動車に関しても、ユーザー毎に使い方や置かれる環境がそれぞれ異なることから、劣化の進行メカニズムが複雑になると予想される。

現在、LiBの蓄電容量の進歩と小型化により、スマートフォンに内蔵される蓄電池の大容量化が進んでいる。高性能かつ高品質の一方で製品の買い替えサイクルが短いスマートフォンでは、中古デバイスの二次利用が積極的に行われ、市場規模は拡大している。特に、電池の劣化度合いの評価は、二次利用の重要な指標となる。すなわち、この分野で確立されるLiBの劣化に着目した二次利用は、資源の有効活用とゼロエミッションの実現に向けて、他の様々な分野への展開が期待される技術の一つと考えられる。ところが、スマートフォン等のモバイルデバイスは、LiBが内部に組み込まれていることが多く、電池の劣化状態を簡潔な方法で診断することが容易ではない。

そこで本研究では、スマートフォンの使用方法に関するアンケート調査結果のみに基づいて、リチウムイオン二次電池の劣化を診断する方法を検討する。ユーザーの使用方法のクラスター分析と、ロジスティック回帰を用いた劣化診断モデルを組み合わせ、スマートフォンの劣化を診断する方法を提案する。提案する手法は蓄電池の劣化を物理的測定手法によって直接診断する一般的なアプローチとは異なり、機器の使い方に着目して電池の劣化を診断することを目指す。それにより、間接的な劣化診断を行うと共に、LiBの劣化を改善する使用方法をユーザーに提案するレコメンド手法への展開も考えられる。またこの手法は、専用の測定機器や時間を要する充放電測定を用いず、使用状況に関する情報のみから間接的な劣化診断を行うため、定置型蓄電池や電気自動車のLiBの劣化診断を簡易的に行う応用も期待される。

本研究では、携帯市場が収集したスマートフォンの使用方法に関するアンケートデータを用いて、ユーザーの使用方法の分析とLiBの劣化を診断する方法を検討する。このデータセットは、各携帯会社が推奨している使い方に基づいて、全国のスマートフォン利用者900名から取得したものである。設問の内容を表1, 2に示す。表1の質問には、スマートフォンの機種などの属性データと、購入年月やアンケート回答時点でのバッテリーの最大容量が含まれる。すなわち、使用開始からの経過時間と、それに対するバッテリーの劣化量を算出することが出来る。表2の質問項目は使用の仕方に関する質問項目であり、

「はい」「たまにはいい」「いいえ」の3段階で回答される。なお、アンケート結果には個人を特定できる情報は含まれていない。

使用日数については、購入年月を起点として使用日数を計算した。終点は、アンケート実施時期を考慮して2020年10月1日とした。また、分析の容易化のため、バッテリー最大容量をバッテリーの劣化度(0~100%)に変換した。

バッテリーの劣化度は、放電容量の差の割合で定義される。初期のサイクルでの放電容量を c_{init} 、 n サイクル目の放電容量を c_n とすると、 n サイクル目の劣化度(State of degradation; SOD)は次式で示せる。

$$SOD_n = \frac{c_{init} - c_n}{c_{init}} \times 100 \quad (1)$$

しかし、今回のアンケートでは、放電容量を測定できないため、アンケート項目のバッテリー最大容量を用いて、SODを定義した。バッテリー最大容量を $Battery_{max}$ とすると、アンケート回答時点のSODは次式で表せる。

$$SOD = 100 - Battery_{max} \quad (2)$$

さらに、ベンダーによって内部回路の設計指針が大きく異なることが予想されること、すでに二次利用を行っているものは内部蓄電池の劣化状態が異なることや極端な回答となって分析に影響することから、以下の条件に合致するもののみを対象とした。

- 1) 特定のメーカー (A社) の端末
- 2) 新品から使用を開始したもの
- 3) バッテリー最大容量(%)が50~100%
- 4) 使用日数が7年以内のもの

分析には、各種の統計解析手法を用いた。このとき、アンケートの回答を順序尺度として用いた。

まず、アンケートの回答によって内部蓄電池の劣化への影響を比較した。使用日数に対する劣化量のプロットを図1に示す。図より、使用日数が長いほどLiBの劣化量が大きくなる緩やかな傾向と、同じ使用日数でも劣化量が大きく異なることがわかる。一方で、使用日数は大きくても、ほとんど劣化が進行していない場合もある。すなわち、使い方によって劣化量が大きく異なることが示唆される。

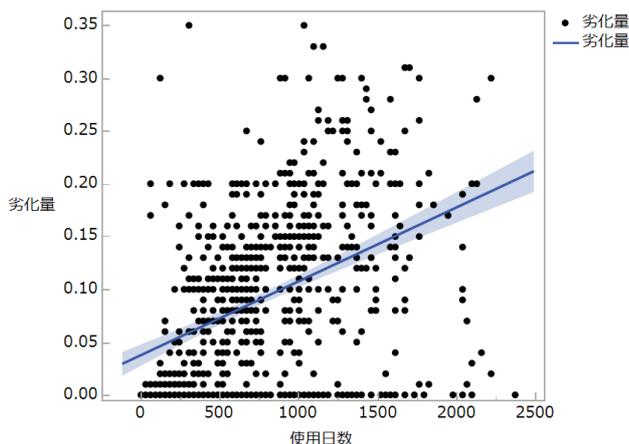


図6, 使用日数に対するスマホバッテリー劣化量.

次に、使用日数以外のアンケート項目から、劣化に寄与する項目を抽出するための多変量解析を行った。回帰には、リンク関数にロジット変換を用いる一般化回帰を行った。ロジット変換は、 $-\infty$ から $+\infty$ の範囲を持つ説明変数を0から1の範囲を持つ応答変数にリンクさせる特徴を持つ。

また、一般化回帰を行う際、変数が多く、分析の汎化性能に影響が出ると予想されることから、変数選択を行った。変数選択の手法として、相関係数による変数選択や主成分分析による次元圧縮、罰則項を用いた変数選択が一般的に知られている。今回は、分析データの特徴量の次元が高く、不要な特徴量が多く含まれる可能性が高い場合に多用される Lasso 回帰を用いる推定をおこなった。Lasso 回帰には、変数選択と正則化の両方を実行し、統計モデルの予測精度と解釈可能性を向上させるという特性がある。これは、 L_1 ノルムを罰則項として用いることによる性質である。 p 個の変数 \mathbf{X} において、回帰係数 $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p)^t$ に対し、 L_1 ノルムを罰則項とし、回帰係数の推定値 $\hat{\boldsymbol{\beta}}_{lasso}$ を、次式による求める。

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}_{lasso} = \operatorname{argmin} \left(-l(\boldsymbol{\beta}) + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_j| \right), \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (3)$$

このとき、 $-l(\boldsymbol{\beta})$ は負の対数尤度関数、 λ は正則化パラメータである。推定の結果、いくつかの係数がゼロとなり易い性質を持つため、パラメータ推定と同時に特徴選択が行われる。

これらの手法を用いて、アンケート項目を変数とした変数選択を行った。一般化回帰の設定パラメータは文献を参照されたい。また、Lasso 推定による非ゼロの変数の標準化した推定値、選択されたアンケート項目も文献に示している。なお、同じ設問であっても、回答によって推定値が変化するため、回答ごとに推定値をそれぞれ示している。特に、使用日数の劣化への寄与が強いことがわかる。また、充電に関する項目が選択されていることから、充放電頻度が高いことが劣化に寄与することが推察される。一方、省エネ対策アプリや不要なアカウントの停止などスマートフォンの電池の使用量を抑える使い方を行う利用方法は、推定値が負であることから劣化を緩和する使い方と推察される。

次に、Lasso 推定で絞り込んだアンケート項目に対し、SOD に関する決定木分類を行った。分類木の深さ 2 までの結果を図 3 に示す。深さ 2 までの結果より、使用日数の変数が閾値として用いられていることがわかる。特に、深さ 1 の分岐に注目すると、549 日を基準としてその前後に大きく分けられている。深さ 2 の分岐に注目すると、305 日を基準として前後に、1035 日を基準に前後に分かれていることがわかる。これらのことから、使用日数によってデータの特徴が異なることが推察される。

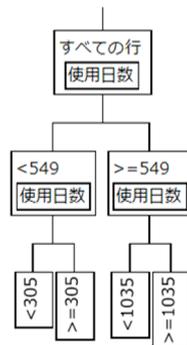


図 7、決定木の深さ 2 までの分岐図。

劣化に対するスマートフォンの利用方法の傾向を分類するため、Lasso 推定で絞り込んだアンケート項目を用いて各種の手法を用いたクラスター分析を行った。まず、Kmeans 法による分析を行った。クラスター数は 3 とした。分析結果のバイプロットを図 8 に示す。1 のクラスターは、充電の頻度が高く、電池の消費度も高い、劣化の大程度のクラスターと予測される。2 のクラスターは充電の頻度が中程度、電池の消費度が少なく、劣化の小程度と予測される。3 のクラスターは、電池の消費度がわずかに多く、充電頻度も中程度であるため、劣化の中程度と予測される。

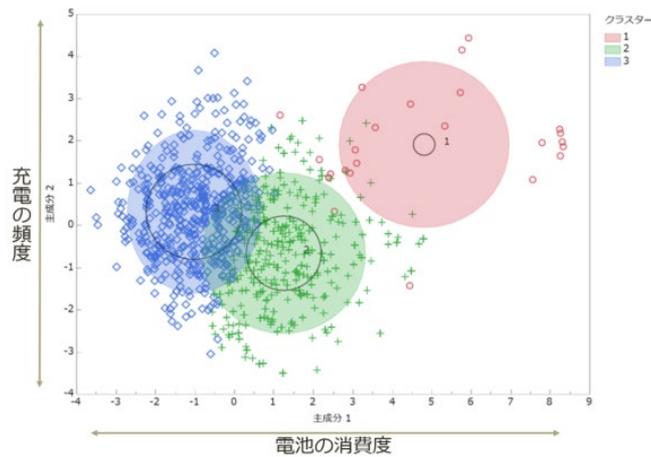


図8, Kmeans 法クラスター分析のバイプロット.

次に、階層化クラスター分析を行った。なお、階層化クラスター分析に用いた個体間の距離には、ユークリッド距離、クラスター間の距離にウォード法を用いた。ウォード法は、クラスターの偏差平方和を最小化するようにクラスターを形成していくため、比較的まとまりのあるクラスターが形成できる利点がある。階層化クラスター分析では、サンプル間の距離に基づき、クラスターを形成するため、事前のクラスター数の定義を必要としない。結果を図9に示す。Kmeans クラスター分析と同様に、劣化量の程度でクラスターに関連があると解釈できる(図9a)。また、図4bでは、アンケート項目に着目し、分析を行った。アンケート項目の「省エネ対策を行っているか」、「電池がゼロになることが多い」の回答を中心にクラスターが形成されている。すなわち、電池の消費量の多さや、スマートフォンの電池の減りに対して敏感であるかなどの使い方と、劣化量が対応しているものと考えられる。

この結果より、Lasso 推定により絞り込んだ質問項目をもとに利用者の使用傾向を分類し、劣化の度合いを大まかに予測することが可能と考えられる。また、劣化を抑制する使い方のリコメンドへの応用可能性も期待される。

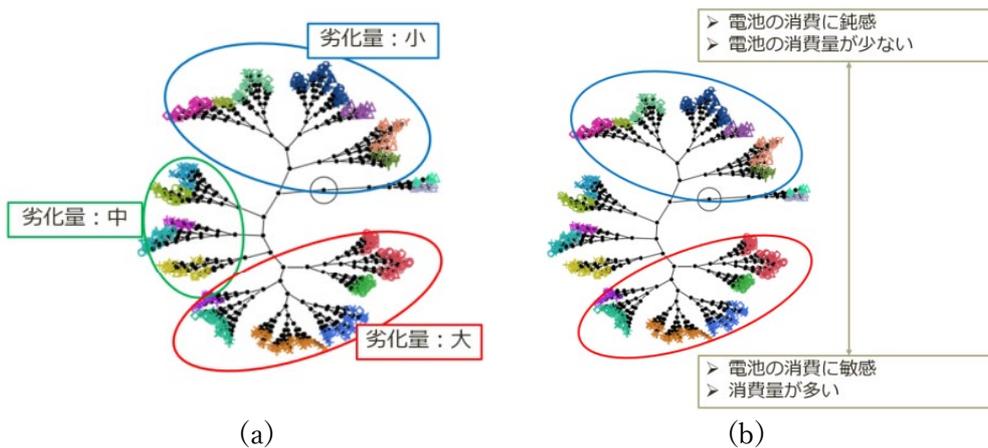


図9, 階層化クラスター分析の星型樹形図. (a)劣化量に着目した解釈. (b)アンケート項目による使い方に着目した解釈.

構造方程式モデル(Structural Equation Models; SEM)は、直接観測できない潜在変数を導入し、潜在変数と直接観測できる顕在変数の因果関係を検証するモデリング方法であり、因子分析と回帰分析を融合

させた分析方法である。潜在変数によって、顕在変数の背後にある共通した要因をまとめ、本来観測できなかった変数を用いて因果関係を表現できる。この潜在変数を導入するため、項目により、潜在変数の定義を行った。結果として得られた SEM の推論結果のパス図を図 10 に示す。結果より、充電方法などの充電に関する項目である「充電→劣化」、「使用環境→劣化」、「時間→劣化」が電池の劣化に寄与に関係があることがわかる。このことから、充電を行うなどを利用方法が劣化に寄与することが推察される。

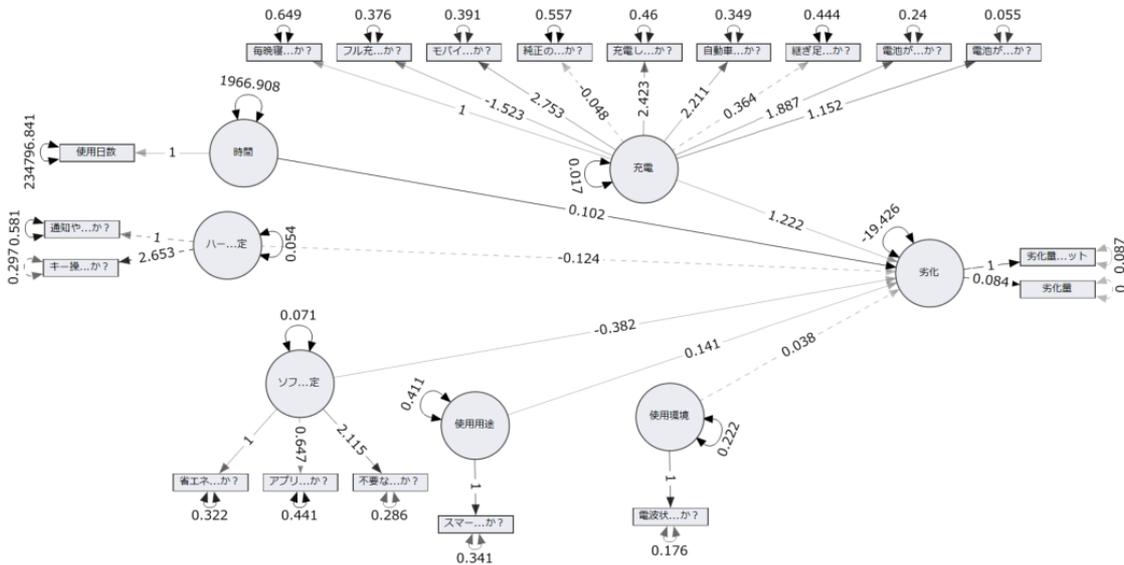


図 10, 構造方程式モデルの計算結果.

3. IoT センシングを用いた環境品質の評価とエネルギー消費の分析手法開発[1][5]

3.1. 位相的データ解析を用いた室内環境に関する時系列多次元データの分析

超スマート社会 (=Society 5.0) では、実空間とデジタル空間が IoT (Internet of Things) によって相互連携するシステムが求められている。具体的には、電力システムなどに代表される物理的実体と情報技術が融合し、それらの間の相互作用により全体システムとしての自動化・自律化の範囲を拡げるとともに、新たなサービス・ビジネスが継続的に創出される仕組みを備えた社会である。そのような社会の実現に向けて、リアルタイム性、高信頼性を担保したサービス・プラットフォームの確立が望まれている。

このような社会においては、情報の利活用の機会は格段に増加し、問題解決に利用されることが予想される。この問題解決のアプローチとして品質管理分野で確立、体系化されてきた Total Quality Management においては、何が問題であるかを、誰にでも明確に理解出来るようにするための「可視化」の方法が、問題解決における重要な点の一つといわれている。そのための代表的な技法が、産業界における問題解決の手法として確立された QC 七つ道具の要素である、グラフや管理図などである。QC 七つ道具は、上手に活用すれば現場の問題の 95%を解決することが出来ると言われる手法群である。その中でグラフや管理図は、可視化による現状把握に用いられている。例えば、取得されたデータを、人間が直感的に把握可能な 2~3 次元空間に、散布図として表示することで、データの傾向や利用方法が吟味可能となる。

しかし、膨大な量のデータや時系列データから、短時間で有益な知見を得るには、グラフを描写するだけでは難しい。例えば多次元の時系列データを散布図に描写し、各属性の性質による分類手法や、時系列の系列ごとに相関係数をもとに散布図として描写する手法が提案されている。前者の手法では時系列データを断片的に分析するため、その断片的な結果を多数用意する必要がある。一方後者の手法では、時系

列データを低次元に縮約できるものの、元のデータの系列間の関係性を把握することが難しい。

このような多次元の時系列データは、IoT 技術の進化に伴い、容易かつ大規模に収集されるようになった。しかし、それらの可視化による分析手法として汎用性のある方法は提案されていない。そのような手法が開発されることにより、多次元の時系列データより新たな知見を可視化し、最適な方策の立案などに寄与することが可能になる。

近年、多次元のデータを分析する手法として位相的データ解析 (Topological Data Analysis; TDA) の活用が提案されている。TDA はトポロジーの概念を用いてデータの“形状”に着目した分析を行う手法の総称であり、データに含まれるノイズに強いという利点がある。代表的な可視化の手法としては、Persistent Homology 法と Mapper 法の 2 種類がある。そのうち Mapper 法は、多次元なデータセットといった、データの構造把握が困難な場合に、情報量の低下を抑制した低次元化とクラスタリングを行うことで、データの形状を把握しやすくする手法である。Mapper 法は植物フェノミクスデータの分析や企業の技術空間分析などに応用されている。本研究で扱うような時系列多次元データについては、一般的な従来法と比較して Mapper 法を用いた分析がよく適合すると考えられる。例えば、主成分分析を時系列多次元データに適用する場合、次元縮約の方向性によって時系列に関する情報が損なわれる場合がある。また、得られた主成分を低次元空間上に可視化して用いるため、個々の特異の値を分析する際の尺度が主成分の解釈に基づくものとなり、具体的な情報とは一致しない。また、データの数値に応じて地図上にシンボルやグラフを示したり、色調を変えたりする Mapping 法は、低次元のデータを可視化することには強力な方法である。一方で、データの次元が多いと描写する図の数が多くなり、データ間の相関関係の把握など結果の解釈が困難になる。Mapper 法は次元縮約における情報保持性、時系列情報の保持性、低次元空間での視認性のいずれも適合する方法である。すなわち、Mapper 法を用いることにより、多次元かつ時系列データを縮約することでデータの特徴を可視化することと、得られた特徴より元の詳細データに戻って時間空間的な分析を行うことの両者が可能となる。

本研究では、多次元の時系列データに対して TDA を適用して可視化を行い、課題発見と対策方法の確立に寄与する手法として活用することを提案し、その有効性の検証結果を示した。具体的には、多次元の時系列データとして、電気通信大学附属図書館内に設けられたフリーアドレス学修空間である Ambient Intelligence Agora (以下、Agora) 内に設置された大量のセンサーから取得される環境データを用いた。これにより、今後主流となる職場形態の一つとしてのコワーキングスペースにおける環境課題を抽出した。

本研究では、前述の多次元時系列データの分析において、利用者の作業や学習の効率に影響を与える CO₂ 濃度の上昇とその環境要因の抽出に TDA を活用した。その手順と結果を示す。計算には Python3.7.3 を使い、Mapper 法の実施には Python のパッケージである Kepler Mapper1.3.0、および Scikit-learn 0.20.3 を使用した。また、計算機環境として、Intel Core i7 @ 2.5GHz、メモリ 16GB の Windows PC を用いた。

分析したデータは、2018 年 4 月 1 日から 2020 年 3 月 31 日まで計測した温度、湿度、照度、人感センサー反応数および CO₂ 濃度と 2019 年 4 月 1 日から 2020 年 3 月 31 日までの消費電力量の値である。温度、湿度、照度、人感センサーは各 45 台設置されており、データ系列は 180 列となる。また、電力消費は 187 台のスマートプラグによる 187 列になる。これらのデータを 10 分毎に取得した。すなわち、2018 年 4 月 1 日から 2019 年 3 月 31 日までは 52560 行のデータとなり、2019 年 4 月 1 日から 2020 年 3 月 31 日までは 52704 行のデータとなった。したがって分析対象となるデータは、2018 年 4 月 1 日から 2019 年 3 月 31 日が 52560×180 の行列、2019 年 4 月 1 日から 2020 年 3 月 31 日までが 52704×367 の行列

となる。

まず、2018年4月1日から2019年3月31日までに観測された温度、湿度、照度、人感に関するデータを用いて、年間の変動に関する分析を行った。Mapper法によるグラフはフィルター関数や被覆のパラメータによって結果が変わる。多くの場合では、試行錯誤によってパラメータを決定する必要がある。その際、分析に適する条件として、ノードが少なくかつクラスター間のつながりが多いことが判断の指針とされている。これはクラスター同士の関係を視覚的に判断できるような結果の方が、データを分析する際の解釈が容易になるためである。本研究では、時系列つながりを考慮するために、開館時と閉館時(休館日を含む)を分けることなく、測定されたデータすべてを分析対象にして、それに対応できるパラメータの設定を行った。

Mapper法による描写結果の一部を図11に示す。Truncated SVDを計算し、A₁₈₀のデータを2次元のデータA₂へと縮約した。得られた行列A₂の第一基底、および第二基底の値を用いる。ノードの中に含まれるデータの数が多きほど、すなわちクラスタリングされて生じるクラスターが大ききほど、ノードの大ききは大きくなる。また着色に関しては、計算された基底成分の値を0から1の範囲の正規化した尺度をもとにしている。そして、カラーパレットは色覚異常にも対応しているviridisに設定することで、汎用的な視認性を考慮した。ノード内に含まれる第一基底の平均値をもとに決定され、基底成分の値が大ききものほど明るく、小さいものほど暗い色で示される。第一基底の年間変動を示しており、夏の時期に相当する期間には小さく、冬の時期では大きくなる季節変動を表している。一方、第二基底は日内変動に対応しており、昼間の時間に相当するときは値が大きき、夜の時間では値が小さくなる日内周期を示している。ゆえに、第一基底と第二基底の大小関係から、図11のように夏と冬、および開館時間と閉館時間のような関係性がみられることが確認できる。また、図の中央にある大きなノードの集まりのうち、上半分は附属図書館の閉館の時間帯のデータの集合に、下半分は開館時のデータの集合に対応している。すなわち、日内変動は上下方向、年内変動は左右方向に配置されているものとみなされる。言い換えれば、観測された多次元時系列データが、マクロな時系列構造を残したまま2次元に縮約されていることが示唆される。

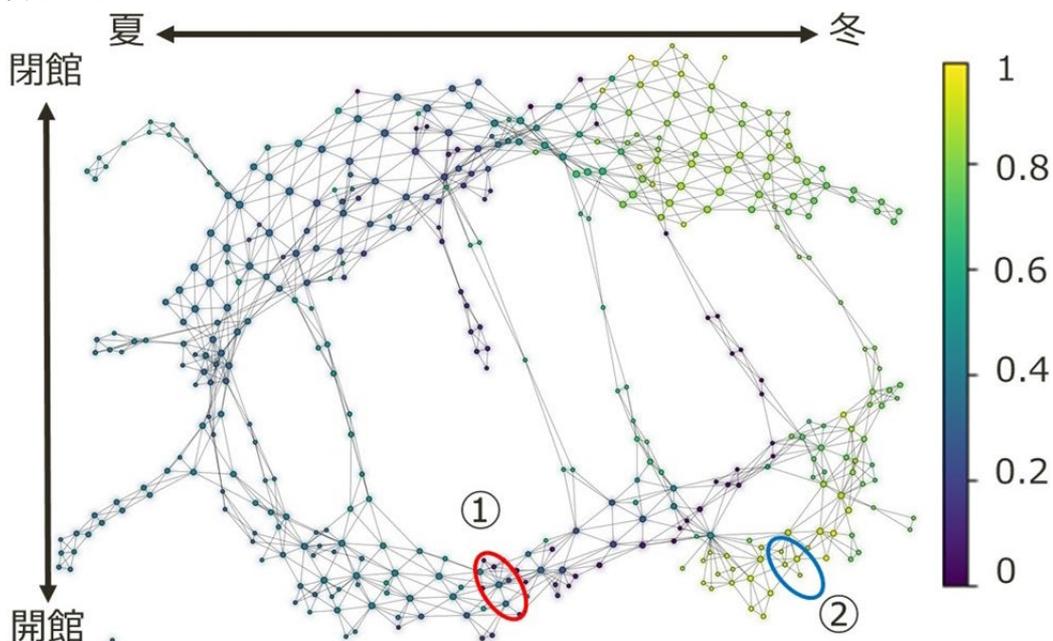


図11, Mapper法による結果。Truncated SVDの結果に準拠した色付け。

次に、Mapper 法による描写結果において CO₂ 濃度の変動を重ね合わせることにより、CO₂ 濃度が上昇する際に関係性の深い環境条件を考察する。本研究では利用者が多く集まるエリアと CO₂ 濃度の関係の考察を通じて、Mapper 法を応用する方法を検討する。すなわち、描写結果の色付けを CO₂ 濃度に対応させることにより、ノード内に含まれるデータと CO₂ 濃度との関係が可視化される。この結果を図 12 に示す。図 11 のグラフ構造に対し、CO₂ 濃度に準拠した色付けにより、明るく着色されたノードと暗く着色されたノードの繋がりが可視化される。明るく着色されたノードは CO₂ 濃度が高いことを示しており、そのノード内に含まれるデータやその時間帯は CO₂ 濃度の上昇に寄与する要因が含まれると考えることができる。一方、暗く着色されたノードは CO₂ 濃度が低いことを示している。着色の処理は、ノードに含まれるデータの CO₂ 濃度の平均値を、観測された期間の CO₂ 濃度の値を 0 から 1 の範囲の正規化した尺度に当てはめて対応させている。さらに、本研究の分析の焦点である高 CO₂ 濃度のノードの発見を容易にするために、対数スケールの着色となるように viridis のカラーパレットにあてはめた。なお、図 12 では閉館時を表すノードであっても、比較的明るく着色されるノードが見られる。これは残留した空気によるものと考えられる。また、本研究においては閉館時に利用者は立ち入り出来ないため、夜間の換気と対流によって CO₂ 濃度は自然と低下する。そのため、リスク管理、および制御の対象ではないことから、詳細の分析対象から除外した。

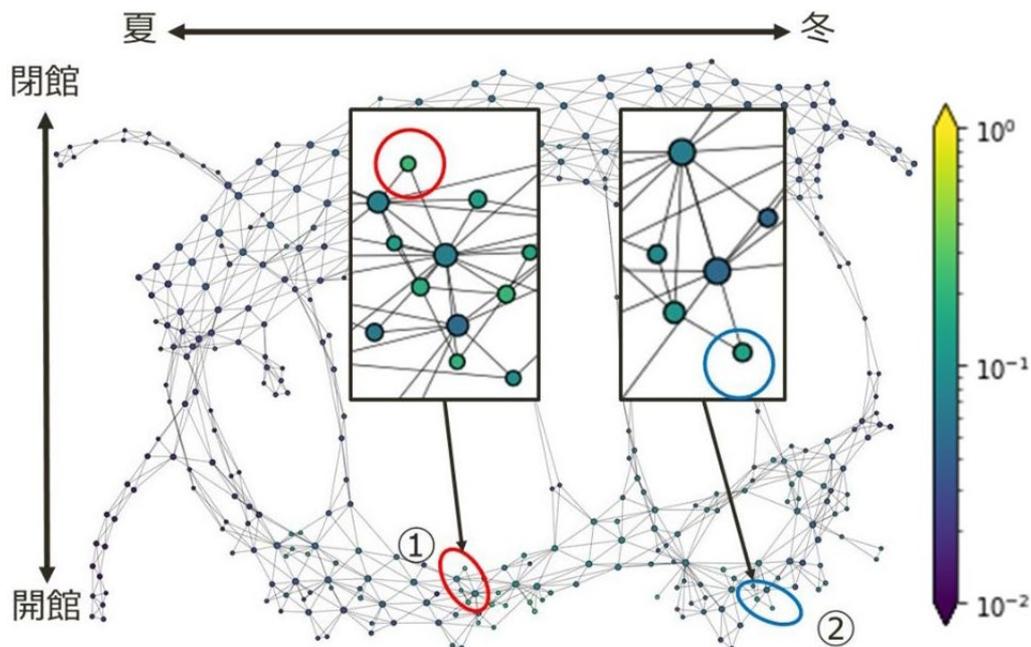


図 12, Mapper 法による結果。CO₂ 濃度に準拠した色付け

本研究では多次元時系列データを分析する際に、Mapper 法による描写によって視覚的にデータの特徴を把握し、元データに対応させて分析を行う方法について提案した。多次元のデータを 2 次元の図に縮約してデータ同士の構造を可視化し、注目する特性の強弱の色調に重ね描きすることによって視覚的な把握を容易にすることが出来た。具体の事例として、フリーアドレス学修空間の CO₂ 濃度の上昇の現状把握と、それに寄与する要因の考察を行った。特に、Mapper 法を用いて多次元のデータを同時に取り扱うことにより、特定エリアの CO₂ 濃度の上昇に対して、他の隣接エリアの人感センサーの反応値や消費電力などの特性が影響するようにみえることがわかった。具体的には、人感の値が通常よりも高くなった後の 2~3 時間後には、該当エリアの CO₂ 濃度が高くなる恐れがあるため、それより前に換気を行うよ

うに、換気装置を制御することで空気の流れを変更する方法が考えられる。また、事前に局地的な CO2 濃度を予測し、利用者に CO2 濃度を知らせることが出来れば、より適切な行動変容が生じるとともに、CO2 濃度の局所的な増加を避けることが可能になる点が、フリーアドレススペースの利点と考えられる。変数間のつながり、すなわちその構造を考慮し、目的とした変数への関連を可視化することにより、環境制御へ利活用することが可能になると考えられる。エネルギー消費との関係についても[5]にて検討、議論し、その成果は現在投稿中である。

4. 今後の方針

2020 年の研究成果として、2050 年カーボンニュートラルにおける自律分散型エネルギーインフラの必要性、要求技術を定義し、その一部として、デバイス認識、劣化予測、ユーザの使用方法の影響、多次元時系列データの解析方法について検討を行った。以上の研究を統合し、高度にネットワーク化された分散型エネルギーシステムに対してディペンダビリティとレジリエンスを付与するためのシステム評価、設計の体系を構築することを目標として、研究を進める。

成果一覧

査読付き論文

- [1] 遠藤駿, 横川慎二; "位相的データ解析を用いた室内環境に関する時系列多次元データの分析," 電子情報通信学会・システムソサイエティ和文論文誌, Vol.J104-D, No.4, pp. 318-327 (2021).
- [2] 武山真弓, 佐藤勝, 安井崇, 横川慎二; "エゾシカ肉のおいしさのリアルタイム計測", 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ和文論文誌, Vol. J103-C, No. 9, pp. 387-394 (2020), 招待論文.
- [3] Shinji Yokogawa; "Applications of lifetime distribution functions with two shape parameters for reliability analysis in advanced interconnect technologies: a brief review," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 59, pp. SL0802-1-13 (2020).
- [4] Tomoki Murota, Toshiki Mimura, Ploybussara Gomasang, Shinji Yokogawa and Kazuyoshi Ueno; "Humidity reliability of commercial flash memories for long-term storage," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 59, SL0802-1-SL0802-4 (2020), brief note.

国際会議

- [5] S. Endo and S. Yokogawa; "Trends between indoor CO2 concentration and electricity usage through topological data analysis," 2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies, pp.530-531 (2021).

国内会議

- [6] 浅野実, 横川慎二; "ユーザーの利用調査データに基づくモバイル端末のバッテリー劣化傾向の診断," 電子情報通信学会信学技法, R2020-36 (2021).
- [7] 中里諒, 野秋拓真, 横川慎二, 市川晴久, 後川知仁, 武田隆; "航空 LiDAR データと GIS ソフトウェアを用いた太陽光沿面発電における検討," 電子情報通信学会信学技法, EE2020-25 (2021)
- [8] 横川慎二, 浅野実, 中里諒; "分散電力の統合とグリッドレジリエンス確保のためのデバイス識別と蓄電池診断技術," 第 63 回自動制御連合講演会, 2H4-5 (2020).
- [9] 遠藤駿, 横川慎二; "環境・エネルギーセンサーネットワークデータの位相的データ解析を用いた空間環境評価," 第 33 回秋季信頼性シンポジウム, S5-2 (2020).
- [10] 浅野実, 横川慎二, 市川晴久; "自律分散グリッドのセキュリティ確保のための機械学習によるデバイス識別方法," 第 33 回秋季信頼性シンポジウム, S5-1 (2020).
- [11] 中里諒, 横川慎二; "リチウムイオン二次電池の内部状態を考慮した階層ベイズによる容量劣化診断," 第 33 回秋季信頼性シンポジウム, S2-1 (2020).
- [12] 横川慎二, 石垣陽, 遠藤駿, 高原廉, 川内雄登; "Ambient Intelligence (環境知能) によるフリーアドレススペースのリスク評価," 第 11 回横幹連合コンファレンス, C-1-4 (2020).
- [13] 中里諒, 横川慎二; "電気化学インピーダンス法と階層ベイズによるリチウムイオン二次電池の容量劣化量診断," 電子情報通信学会信学技法, R2020-10 (2020).

解説記事

- [14] 横川慎二; "故障物理に基づくワイブル解析の拡張", 日本信頼性学会誌, Vol. 42, pp.110-115 (2020).

2.主要研究成果

2.2 AI を用いた先進エネルギーデバイスの逆設計とエネルギーシステムの最適化

曾我部 東馬 准教授

情報理工学域 III 類/基盤理工学専攻 電子工学プログラム 兼務

I. 2020 年度計画概要

本年度は、AI 予測最適化技術を活用し、中間バンド太陽電池に適したコアシェル型半導体量子ドットの探索、量子ドット/ペロブスカイト界面におけるキャリア移動過程の解析各要素技術の構築、電磁場解析による光マネジメント構造の逆設計などの要素技術の確立を目指した。目的関数（耐久年数+透過率+変換効率-発電コスト）を構成するパラメータの相関を能動的に学習させ、①赤外光の光閉じ込め係数を約 25 倍に高めるための最適化光学構造の実現、②透過率 20%以上且つセル変換効率 15%のコアシェル中間バンド太陽電池の実現という目標に向かって研究開発を進めてきた。本年度の開発内容と成果は以下となる。

(1) グラフ CNN を用いたコアシェル型半導体量子ドットの逆設計と最適化

機械学習手法を用いた光吸収・発光スペクトルの予測については、コアシェル型 CdTeSe 量子ドットの基本構造を変化させ、Gaussian16 時間依存密度汎関数法(TDDFT)を用いて発光スペクトルデータベースを構築した。4 種類の機械学習手法について学習・予測テストを行った結果、自己符号化器 NN 法が最も低い MSE 値を持つことがわかった。今後は予測精度のさらなる向上、溶媒効果とりガンド効果のような実験条件を考慮した予測モデルの構築と検証を進めていく。

強化学習を用いた量子ドットの構造逆設計については、学習済みの予測モデルを用いて強化学習を適用した量子ドットの逆設計を行った。カルバック・ライブラー情報量-KL (目標スペクトル | 探索スペクトル)を報酬として強化学習を行った結果、学習の進行に伴い報酬-KL距離が増加することが明らかになった。この結果から、逆設計の不成功は示唆されるものの、予測モデルの予測精度の低さが逆設計失敗の原因の一つと考えられるため、今後は予測モデルの予測精度の改善と物理的なエネルギー制約条件による探索範囲の制限などを取り入れ逆設計の確度を向上させていく。

(2) FDTD 近似型ニューラルネットワークと深層強化学習を用いた光閉じ込め構造の逆設計

透過率と比例したシースルーの特徴を実現するために、中間バンドデバイスの長波長を効率よく吸収する最適な光閉じ込め構造を設計しなければならない。そのためにデバイスシュミレーターの 3 次元化、光学構造の計算とデバイス変換効率の計算を連動した光学構造の設計が不可欠である。これらの条件を考慮しながら、有限要素法計算パッケージ COMSOL 上で 3 次元中間バンド太陽電池 (IBSC) のドリフト拡散モデルの作成を試み、その作成に成功した。これまで汎用性のある 3 次元 IBSC のデバイスモデルは存在していなかった。さらに、中間バンドにおいて最も重要な生成割合 G_{IV}, G_{CI} と再結合の割合 R_{IV}, R_{CI} 間の再結合割合律速条件： $(R_{IV} - G_{IV}) - (R_{CI} - G_{CI}) = 0$ に関しても、我々は初めて厳密な検証に成功した。

3 次元波動光学による量子構造の光閉じ込め干渉効果については、COMSOL の 3 次元波動光学モジュールを用いて量子井戸型 $p-i-n$ 中間バンド太陽電池のモデリングを行い、反射と干渉による光の閉じ込め効果を確認した。光電場の増強効果は中間バンド太陽電池の短絡電流の増加に直接つながるため、今後は量子ドット中間バンド太陽電池の光閉じ込め効果を確認していく。

GaAs/AlGaAs 中間バンド太陽電池の構造の最適化と逆設計については、まず光学構造の逆設計を

行う前に、強化学習を用いたデバイス逆設計の学習フレームワークを構築することを試みた。そのために、中間バンド太陽電池発電デバイスの高変換効率化への逆設計を行った。その結果、逆設計シミュレーターを調整しパラメータの数を増加させた大規模探索に適用できる深層強化学習を開発していくこと、さらに、半導体量子ドットとナノ散乱体を含むペロブスカイト型中間バンド型太陽電池の光閉じ込め構造の逆設計を行い光閉じ込め効果による電流増幅を実現していくことが今後の課題であることが明らかになった。

II. 研究実施状況

(1) グラフ CNN を用いたコアシェル型半導体量子ドットの逆設計と最適化

- 機械学習手法を用いた光吸収・発光スペクトルの予測

コアシェル型 CdTeSe 量子ドットの基本構造を変化させ、Gaussian16 時間依存密度汎関数法 (TDDFT) を用いて機械学習用の 240 個の光吸収と 208 個の発光スペクトルデータベースを構築した。また、結晶構造をグラフ表記するためのクーロンマトリックス手法を適用した。図 1 は、量子ドットのクーロンマトリックスを示している。このクーロンマトリックスを入力データとして 4 種類の機械学習手法：ニューラルネットワーク (NN)、ドロップアウト NN、自己符号化器 NN とランダムフォレスト法を用いて学習モデルを構築した。さらに、学習済みのモデルを用いて 10 回の予測テストを行い、得られた 10 個の MSE (平均 2 乗誤差) の平均値から予測精度を評価した。その結果、光吸収スペクトルの予測に関しては、ランダムフォレスト法が最も低い MSE 値を持ち、発光スペクトル予測においては、自己符号

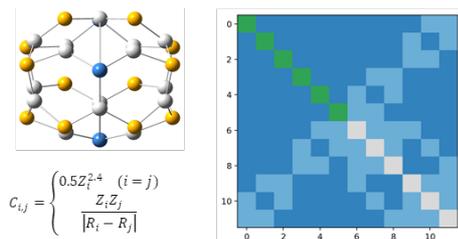


図 1 クーロンマトリックスの計算と表記。

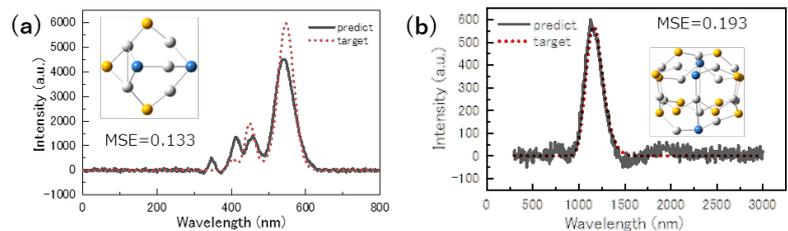


図 2 (a)ランダムフォレスト法を用いた光吸収スペクトル予測例；
(b)自己符号化器 NN を用いた発光スペクトル予測例。

化器 NN 法が最も低い MSE 値を持つことがわかった。図 2 は光吸収スペクトル(a)と発光スペクトル(b)の予測結果の一例を示している。今後は予測精度のさらなる向上、そして溶媒効果とリガンド効果のような実験条件を考慮した予測モデルの構築と検証を進めていく。

- 強化学習を用いた量子ドットの構造逆設計

前項で説明したように機械学習予測モデルで既に 80%を超える予測精度を達成したので、次に学習済みの予測モデルを用いて強化学習を適用した量子ドットの逆設計を行った。遂行した課題は、予め設定した目標光吸収スペクトルになるような量子ドットの構造を探索することである。図 3 に示すように、検証のために構造が既知である量子ドットの光吸収スペクトル(図 3 (a))を TDDFT で計算してターゲット構造と目標スペクトルとした。強化学習の報酬は、探索した構造をもとに学習済みの予測モデルから予測した光吸収スペクトルのカルバック・ライブラー情報量 $-KL(\text{目標スペクトル} | \text{探索スペクトル})$ と

した。図 3(b)は探索後の最適構造(Te 原子の位置変化に注意)とそれに対応した光吸収スペクトルを示している。図 3 (c)は強化学習を遂行する際にトラッキングした報酬曲線を表しており、学習の進行に伴い報酬 $-KL$ 距離が増加していることから、探索したスペクトルが目標スペクトルに近づいていることがわかる。しかし、図 3(a)と(b)を比較すると、探索したスペクトルの中心波長(b)は目標スペクトル(a)と大きくずれており、逆設計は不成功だったことを示唆している。また別の検証結果から原子位置がわずかに 0.7\AA ずれるとスペクトルの中心波長が数百 nm まで変化することがわかっている。以上の結果を踏まえて考えると、機械学習で得られた予測モデルの予測精度が低いことが、逆設計の失敗の原因の一つではないかと考えられる。今後は、予測モデルの予測精度の改善と物理的なエネルギー制約条件による探索範囲の制限などを取り入れ、逆設計の確度を向上させていく。

(2) FDTD 近似型ニューラルネットワークと深層強化学習を用いた光閉じ込め構造の逆設計

● 3次元中間バンド太陽電池(IBSC)のドリフト拡散モデルの作成。

本プロジェクトの挑戦点として、透過率と比例するシースルーの特徴を実現するために可視光を透過させる必要がある。そのために中間バンドデバイスの短波長と長波長の吸収、特に長波長の吸収が肝心となる。また作製可能なデバイスの条件から、透過率の高い 1200nm 以上の長波長を効率よく吸収する必要があるので最適な光閉じ込め構造を設

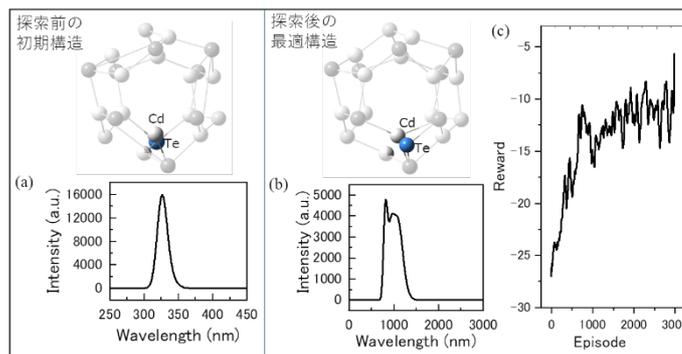


図 3 (a) 探索前の初期構造すなわち目標構造とそれに対応した TDDFT で計算した目標スペクトル; (b) 探索後の最適化構造とそれに対応した光吸収スペクトル;

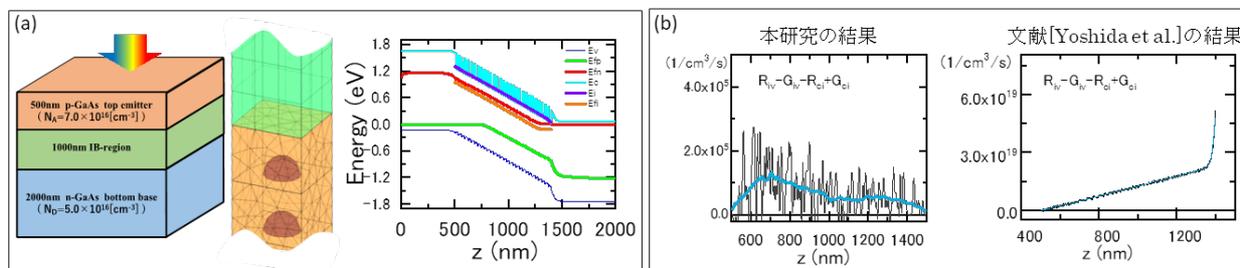


図 4 (a) 探索前の初期構造における有限要素モデルと 3次元ドリフト拡散モデルで計算したバンドダイアグラム; (b) 再結合割合律速条件における文献[Yoshida et al., J. Appl. Phys. 112, 084510 (2012)]との比較。

計しないといけない。さらに作製可能な光の閉じ込め構造を設計するために、デバイスシミュレーターの 3次元化、光学構造の計算とデバイスの変換効率の計算を連動した光学構造の設計が不可欠である。以上の条件を考慮しながら研究を進め、有限要素法計算パッケージ COMSOL 上で 3次元中間バンド太陽電池(IBSC)のドリフト拡散モデルの作成に成功した(図 4)。なお、これまで汎用性のある 3次元 IBSC のデバイスモデルは存在していなかった。さらに、中間バンドにおいて最も重要な生成割合 G_{IV}, G_{CI} と再結合の割合 R_{IV}, R_{CI} 間の再結合割合律速条件: $(R_{IV} - G_{IV}) - (R_{CI} - G_{CI}) = 0$ に関して、我々は初めてモデル作成に成功した。図 4(b)は、引用頻度の高い文献[Yoshida et al., J. Appl. Phys. 112, 084510 (2012)]で使用されてきたシミュレーターの結果と我々の結果の比較を示している。図から本研究における律速条

件は、計算が進むにつれ概ねゼロに向かって収束しているのに対して、文献のシミュレーターの結果は 10^{19} まで大きくずれていることがわかる。

● 3次元波動光学による量子構造の光閉じ込め干渉効果

COMSOLの3次元波動光学モジュールを用いて量子井戸型 p-i-n 中間バンド太陽電池のモデリングを行った。太陽光スペクトルの光強度とほぼ一致した 250nm~2500nm の波長の光を 10nm 刻みで 1 つずつ入射し、反射と干渉による光の閉じ込め効果を確認した。

図 5(a) は代表的な 3つの波長の入射光による光干渉模様を示している。750nm の波長は p 層において最も強い干渉が起きることが確認

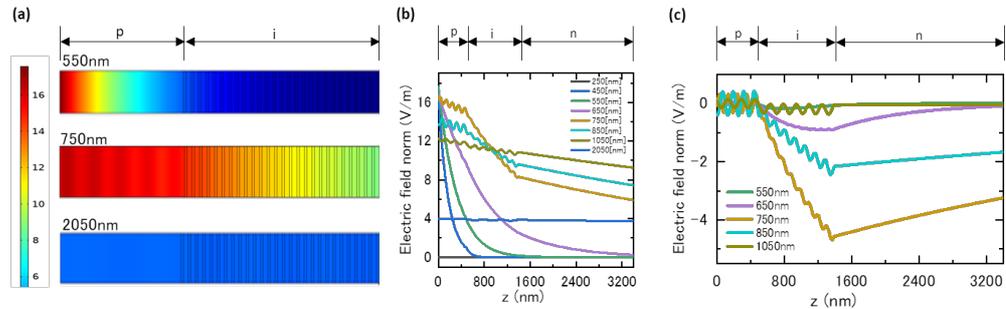


図 5 (a) 3次元波動光学モジュールによる光干渉効果の確認; (b) 量子構造による光強度の減衰; (c) 量子構造による光電場の増強効果。

できた。また通常、光はデバイスに入射すると、図 5(b)のように、光の吸収や散乱により光の強度が侵入長とともに指数関数的に減衰していく。ただし、デバイスに量子構造を導入すると、局所的に強い散乱により光電場の増強を起すことができる。図 5(c)は i 層に量子井戸がある場合と、量子井戸がない場合について電場の差分を計算した結果を示している。図からわかるように、量子井戸がある場合は、650nm~850nm で i 層の強い光干渉により光の電場増強効果が現れる。光電場の増強効果は中間バンド太陽電池の短絡電流の増加に直接つながる。今後は、量子ドット中間バンド太陽電池の光閉じ込め効果を確認していく。

● GaAs/AlGaAs IBSC の構造の最適化と逆設計

光学構造の逆設計を行う前に、強化学習を用いたデバイス逆設計の学習フレームワークを構築することを試みた。そのために、前項の研究結果にもとづき、IBSC 発電デバイスの高変換効率化への逆設計を行った。図 6 は中間バンド太陽電池のベンチマークテストによく使用される GaAs/AlGaAs IBSC のデバイス構造を示している。逆設計するパラメータは中間バンド IB の準位と IB の位置とした。中間バンドが位置する i 層の厚みを 1000nm に固定し強化学習を用いて逆設計を行った。報酬は、探索変換率-ターゲット変換率 30%とした。図 6(a)は探索前後の構造と中間バンドの位置を示している。中間バンドは p 層に入れた方が変換効率の向上に寄与することを示唆している。IB の準位は詳細平衡理論と一致した結果となっており、逆設計妥当性の根拠となった。図 6(b),(c)に示すように、変換効率の向上は短絡電流が 3 倍弱増加したことに由来していることがわかる。変換効率も初期構造の 12.94%から 33.42%まで向上した。今回のターゲット変換効率に関しては、過去の文献値を参考に 30%と決めたが、探索後の最適構造の変換効率はターゲット効率より 3%程度上回ることができ逆設計の有効性が証明できた。

また、短絡電流の増加要因は光吸収量の増加と想定されるため、波動光学モジュールを用いて逆設計の前後の光閉じ込め効果を解析した。図7は逆設計前後のデバイス構造における光閉じ込め効果の比較結果を示している。IBの位置がp層に近くなっている

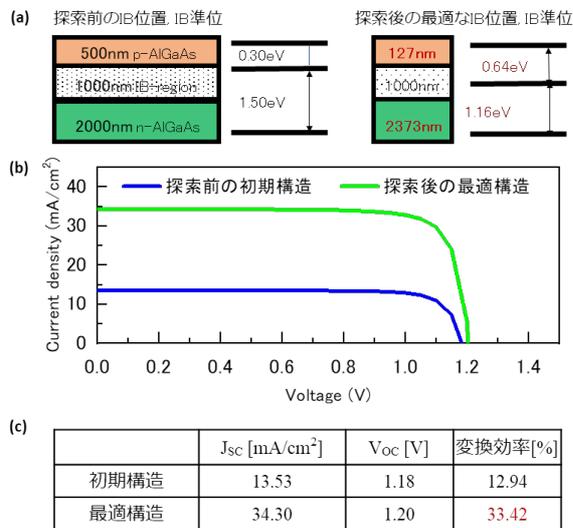


図6 (a) 逆設計前後のIBの準位と位置; (b) 量逆設計前後のI-V曲線及び (c) デバイスの電気パラメータのまとめ。

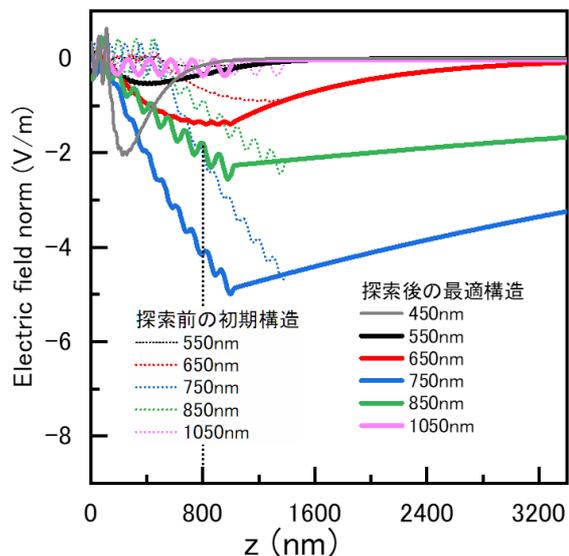


図7 逆設計前後のデバイス構造における光閉じ込め効果の比較。

場合、光電場の増強が検証できた。たとえば図7の800nmに引いた点線から750nmの範囲では、探索前の初期構造の電場より探索後の最適構造が2倍強い電場を生じていることがわかる。また450nmの光吸収に関しては、探索前の構造では電場の増強は起きないが探索後の構造に現れ、図6(c)に示すような短絡電流の大幅な増加の原因となる。今後、さらなる変換効率向上に向け、逆設計シミュレーターを調整しパラメータの数を増加させた大規模探索に適用できる深層強化学習を開発していく。また、半導体量子ドットとナノ散乱体を含むペロブスカイト型中間バンド型太陽電池の光閉じ込め構造の逆設計を行い、光閉じ込め効果による電流増幅を実現していく。

III. 業績・成果一覧

【論文】：

- 1 T.Sogabe, C-Y. Hung, R.Tamaki, S.Tomić, K.Yamaguchi, N. Ekins-Daukes and Y. Okada :
“ Experimental demonstration of energy-transfer ratchet intermediate-band solar cell ”
Communications Physics (2021.3.1)
- 2 C-C. Chen, K. Shiba, M.Sogabe, K.Sakamoto and T. Sogabe : “Hybrid quantum-classical dynamic programming algorithm”, Springer Nature series Advances in Intelligent Systems and Computing: Selected Papers from the Annual Conference of Japanese Society of Artificial Intelligence (JSAI 2020)(in press).
- 3 R.Sogabe, D. Bahadur Malla, M.Sogabe, K.Sakamoto and T. Sogabe : “Impact of Domain Knowledge’s Quality on Inverse Reinforcement Learning”, Springer Nature series Advances in Intelligent Systems and Computing: Selected Papers from the Annual Conference of Japanese Society of Artificial Intelligence (JSAI 2020)(in press)
- 4 T. Sogabe, C.-Y. Hung, R. Tamaki, S. Tomic, N. Ekins-Daukes and Y. Okada: “Fabrication of Erbium Doped GaAs Intermediate-Band Solar Cell”, Proceedings of the European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 13-19, 3-936338-73-6(2020).

【学会論文発表】：

国内：

- 1 斯波 廣大、Chen Chih-Chieh、曾我部 完、坂本 克好、山口 浩一、曾我部 東馬：「量子近似最適化アルゴリズム(QAOA)を用いた複数制約条件付き最適化問題への応用」、2020年(令和2年)第34回人工知能学会全国大会(2020.6.9-12)
- 2 木村 友彰、Malla Dinesh、曾我部 完、坂本 克好、山口 浩一、曾我部 東馬：「部分観測マルコフ決定過程(POMDP)を用いた異常前兆予測検知手法の開発」、2020年(令和2年)第34回人工知能学会全国大会(2020.6.9-12)
- 3 Malla Dinesh、木村 友彰、曾我部 完、坂本 克好、山口 浩一、曾我部 東馬：「ベイジアン逆強化学習を用いた異常前兆予測検知手法の開発」、2020年(令和2年)第34回人工知能学会全国大会(2020.6.9-12)
- 4 高柳 里紗、Malla Dinesh、酒井 剛、曾我部 東馬：「深層強化学習を用いたアメリカンフットボールコーチング戦略の研究」、2020年(令和2年)第34回人工知能学会全国大会(2020.6.9-12)
- 5 Chen Chih-Chieh、斯波 廣大、曾我部 完、坂本 克好、曾我部 東馬：「ハイブリッド量子古典的Ulam-von Neumann線形ソルバーベースの量子動的プログラミングアルゴリズムの開発」、2020年(令和2年)第34回人工知能学会全国大会(2020.6.9-12)
- 6 Sung Jaebok、高橋 慧、Malla Dinesh、坂本 克好、山口 浩一、曾我部 東馬：「深層強化学習を用いたAGV搬送システムのオンライン最適化」2020年(令和2年)第34回人工知能学会全国大会

(2020.6.9-12)

- 7 Sogabe Reed、木村 友彰、Malla Dinesh、曾我部 完、坂本 克好、曾我部 東馬：“Bootstrapping Bayesian Inverse Reinforcement Learning in Robotics through VR Demonstration”, 2020 年（令和 2 年）第 34 回人工知能学会全国大会（2020.6.9-12）
- 8 ChihChieh Chen, 斯波 廣大, 曾我部 完, 坂本 克好, 曾我部 東馬：“Q-learning for square lattice Ising model”, 2020 年(令和 2 年) 第 81 回応用物理学会秋季術講演会（2020.9.8-11）
- 9 斯波 廣大, 坂本 克好, 山口 浩一, 沈 青, 岡田 至崇, 曾我部 東馬：「AI予測最適化手法を用いたペロブスカイト/PbSコロイド量子ドット中間バンド太陽電池の逆設計」2020年（令和2年）第81回応用物理学会秋季術講演会（2020.9.8-11）
- 10 曾我部 東馬, Dinesh Malla, 坂本 克好：“再生エネルギーミックスにおける深層強化学習予測・最適化技術の開発”, 第63回自動制御連合講演会(2020.11.21-22)
- 11 吉田 響、坂本 克好、山口 浩一、沈 青、岡田 至崇、曾我部 東馬：“コアシェル量子ドットの光物性予測における第一原理計算と AI 逆設計 手法の応用”, 第68回応用物理学会春季学術講演会 (2021.3.16-19)
- 12 熊倉 健太、坂本 克好、曾我部 東馬：“強化学習を用いた量子井戸の電荷型量子ビットの電磁波の振幅の最適化”, 第68回応用物理学会春季学術講演会(2021.3.16-19)
- 13 斯波 廣大、坂本 克好、山口 浩一、沈 青、岡田 至崇、曾我部 東馬：“連続行動型深層強化学習を用いた半透明薄型中間バンド太陽電池の 3 次元逆設計”, 第 68 回応用物理学会春季学術講演会 (2021.3.16-19)

国際：

- 1 T. Sogabe, C.-Y. Hung, R. Tamaki, S. Tomic, N. Ekins-Daukes, Y. Okada :“1AO.2.3 Demonstration of GaAs-Based Energy-Transfer Ratchet Intermediate-Band Solar Cell”, EU PVSEC 2020 (2020.9.7-11)
- 2 Tomah Sogabe “Hybrid Quantum Dynamic Programming and Beyond”, IBM Quantum Summit 2020(2020.9.17)

その他（招待講演、著書、セミナー等）：

【著書】

- 1 曾我部 東馬ら共著:「工場・製造プロセスへの I o T ・ A I 導入と活用の仕方」,技術情報機構 (2020/06/30)
- 2 曾我部 東馬：「Python による異常検知」,オーム社 (2021/2/26)

【講演】

- 1 曾我部 東馬：「ハイブリッド量子古典機械学習および最適化アルゴリズムの開発における好機と課

題」, データアントレプレナーコンソーシアム データサイエンス・ワーキンググループ第四回ミーティング,電気通信大学 (2020/11/26)

- 2 Tomah Sogabe : “ Opportunities and challenges for developing hybrid quantum-classical machine learning and optimization algorithms” ,D2T Special Seminar, The University of Tokyo (2020/9/18)

【セミナー】

- 1 曾我部 東馬：「製造・加工業におけるディープラーニングによる異常検知・欠陥予測とその応用」トリケップス社主催セミナーにて1日コース講師を担当 (2020/8/25)
- 2 曾我部 東馬：「人工知能 (AI) による最適化解の学習・予測」情報機構社主催のセミナーにて1日コース講師を担当 (2020.10.5)
- 3 曾我部 東馬：「人工知能 (AI) による最適化解の学習・予測」トリケップス社主催セミナーにて1日コース講師を担当 (2020/11/30)
- 4 曾我部 東馬：「人工知能 (AI) による最適化解の学習・予測」技術情報協会主催セミナーにて1日コース講師を担当 (2021/3/8)

【その他】

- 1 情報処理学会 量子ソフトウェア研究会 運営委員
- 2 情報処理学会 第2回量子ソフトウェア研究会 幹事

【産学官連携・競争的資金実績】：

- 1 NEDO プロジェクト 太陽光発電主力電源化推進技術開発／太陽光発電の新市場創造技術開発／壁面設置太陽光発電システム技術開発 (ビル壁面開口部向けシースルー太陽電池の開発) (2020/7 - 2025/3) (2020 年度 金額 31,900,000 円)
- 2 学術相談：村田機械株式会社 機械学習を用いた搬送システムの制御に関する学術相談, (2020/9 - 2021/3) (2020 年度 金額 300,000 円)
- 3 学術相談：コニカミノルタ株式会社 メカトロニクス製品への深層強化学習の適用(2020/8/1- 2021/3/31) (2020 年度 金額 550,000 円)
- 4 共同研究プロジェクト (東京大学, 電気通信大学, 株式会社グリッド) : エネルギー環境分野における数理モデルと人工知能融合 (2018/7-2023/3) 代表：曾我部東馬

2.主要研究成果

2.3 ペロブスカイト太陽電池の高効率化、高耐久化に関する研究

早瀬 修二 特任教授

1. 研究目標

早瀬研の研究目標はペロブスカイト太陽電池の高効率化、高耐久性化である。研究テーマは①高効率単層ペロブスカイト太陽電池、および30%の光電変換効率を達成するためのペロブスカイトタンデムセルに必須な赤外光変換可能な SnPb ペロブスカイト太陽電池の高効率化、②Pb を含まない Sn ペロブスカイト太陽電池の高効率化、およびこれらの実用化に必要な③円筒形太陽電池の開発である。また④熱電素子の開発は早瀬研で見出したナノ金属酸化物/Sn ペロブスカイト系の高導電性に関する知見を基にしている。昨年は①と②について報告した。今年は①と③について報告する。単層太陽電池の最高効率はバンドギャップが 1.2 eV-1.4 eV の光電変換層を持つ太陽電池で実現できる (Shockley-Queisser limit)。従来のペロブスカイト太陽電池に使われているペロブスカイト (MAPbI₃ (MA: methyl ammonium)) のバンドギャップは 1.55 eV であり、可視光のみが光電変換可能であった。従って 1000 nm 付近 (約 1.2 eV のバンドギャップ) まで赤外光電変換を可能にするペロブスカイトの出現が待たれていた。ペロブスカイト太陽電池の開放電圧ロスが 0.3-0.4 eV であり、潜在的には 1000 nm までの光を光電変換することにより 25%以上の効率が期待できる。我々は 2014 年に世界で初めて赤外光電変換可能な狭バンドギャップペロブスカイト (SnPb ペロブスカイト)太陽電池の太陽電池特性を報告した。①の昨年の目標は高電流タイプを実証できる 34mA/cm²短絡電流 (J_{sc}) を目指すものであったが、今年は開放電圧 (V_{oc}) の向上に焦点を絞り効率 22%以上を目指した。②は使用が制限されている Pb を含まないペロブスカイト太陽電池に関するものである。Pb を含まないペロブスカイト太陽電池の出現が待たれているが、まだ効率は低く、効率向上の方針を見出すことが必須であった。Sn ペロブスカイトのバンドギャップは 1.4 eV であり単層で高い効率が期待できるが、効率は 10%程度でとどまっていた。前期目標として 12%を目指し、13%の効率を達成した。今期は最高効率の更新はできなかったが、効率向上のための指針を得ることができた。円筒形太陽電池は企業と共同研究をして実証研究を進めており、その概略を紹介する。

①高効率単層ペロブスカイト太陽電池

昨年は狭バンドギャップペロブスカイト太陽電池として当時最高効率の 20.4%を報告した。今期は p 層/ペロブスカイト層/n 層のバンドエネルギー準位の最適化を図り、23.3%の効率を達成した。この効率は狭バンドギャップ SnPb ペロブスカイト太陽電池として現在の最高効率である。効率は $V_{oc} \times J_{sc} \times FF$ (V_{oc} :開放電圧、 J_{sc} :短絡電流、 FF :曲線因子)で表されるが、 V_{oc} を向上すれば J_{sc} が低下し、効率向上に結び付かないことが多い。我々は図 1 に示すように J_{sc} を低下させずに V_{oc} を向上する方法を見出し、今回の成果に結びつけた。詳細は現在作成中の論文で報告する。

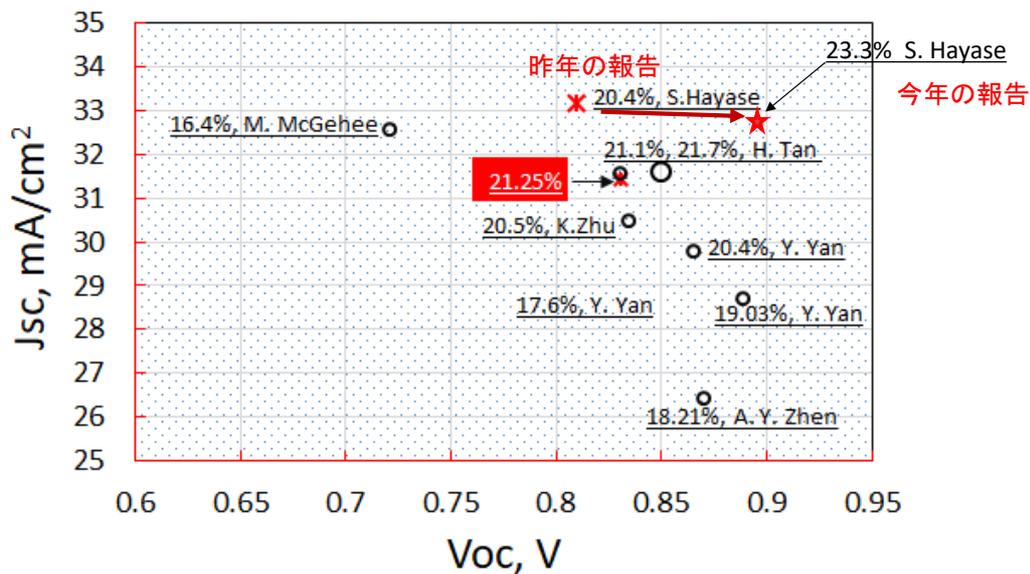
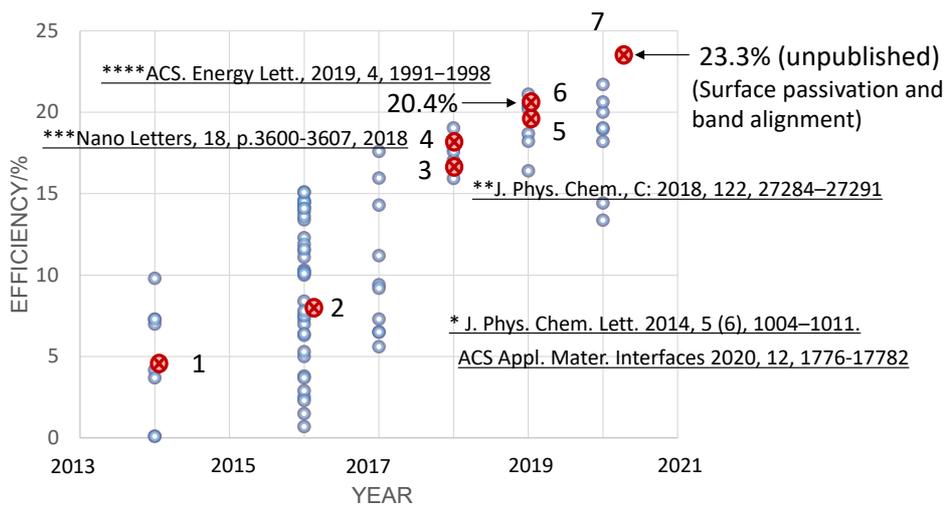


図1 狭バンドギャップペロブスカイト太陽電池の効率と Voc, Jsc の関係
赤字は我々の結果、小さな丸は各研究機関の報告



Method	PVK	Cell structure
normal	$MASn_{0.5}Pb_{0.5}I_3$	FTO/TiO ₂ /PVK/P3HT/Au
inverted	$MASn_{0.5}Pb_{0.5}I_3$	ITO/PEDOTPSS/PVK/C60/BCP/Ag
DMSO complex	$MASn_{0.5}Pb_{0.5}I_3$	ITO/PEDOTPSS/PVK/C60/BCP/Ag
Spike structure	$FA_{0.5}MA_{0.5}Sn_{0.5}Pb_{0.5}I_3$	ITO/PEDOTPSS/PVK/PCBM/C60/BCP/Ag
FTO structure	$FA_{0.5}MA_{0.5}Sn_{0.5}Pb_{0.5}I_3$	FTO/PEDOTPSS/PVK/PCBM/C60/BCP/Ag
Lattice strain	$Cs_{0.025}FA_{0.475}MA_{0.5}Sn_{0.5}Pb_{0.5}I_3$	FTO/PEDOTPSS/PVK/PCBM/C60/BCP/Ag

図2 我々と他の研究機関の効率向上の経緯（世界動向）

図2には我々と他の研究機関の効率向上の経緯を示す。赤丸が我々の結果である。2014年に5%程度の狭バンドギャップSnPbペロブスカイト太陽電池を世界に先駆けて報告したが、その後太陽電池構成の最適化(Method 2)、ペロブスカイト結晶の高純度化(Method 3)、電荷輸送層のバンド構造の最適化(Method 4)、光閉じ込め効果の利用(Method 5)、格子構造のひずみ減少(Method 6)を経て、今回結晶粒界の欠陥密度の低減およびバンド構造の最適化により今年23.3%の効率を達成することができた。

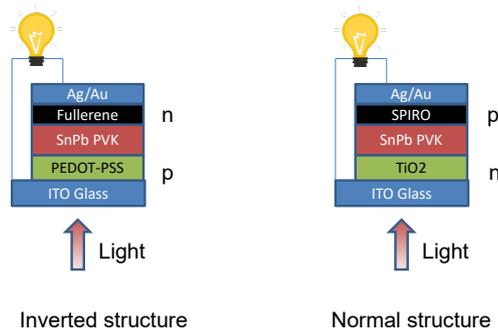


図3 Normal structure(順構造)と inverted structure (逆構造)

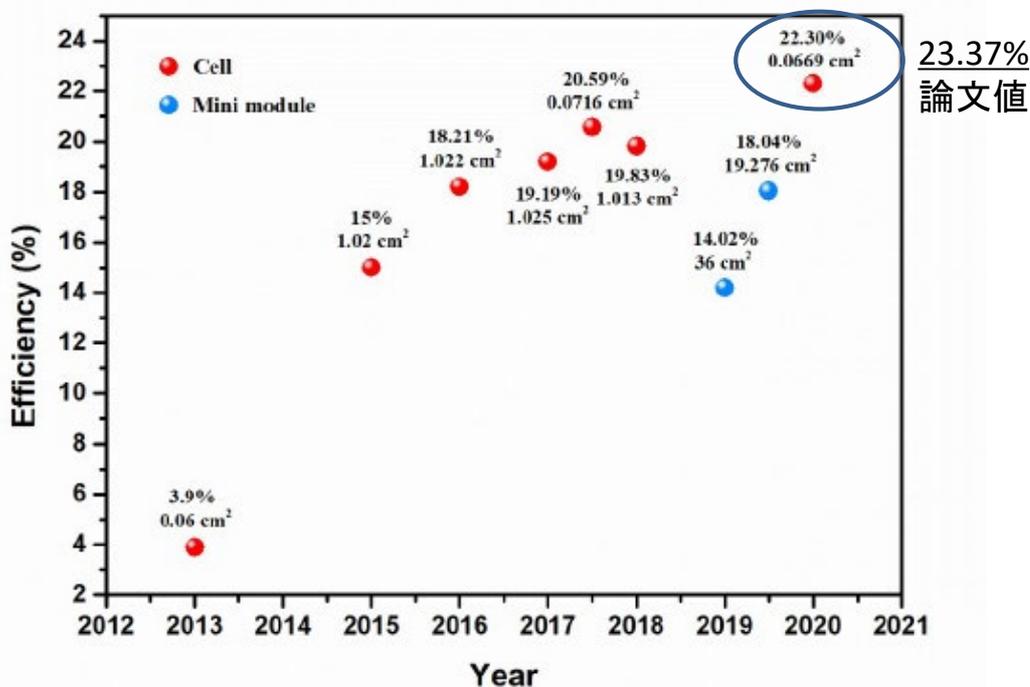


図4 逆構造Pbペロブスカイト太陽電池の公式効率の推移(世界動向)

Xuesong Lin, Danyu Cui, Xinhui Luo, Caiyi Zhang, Qifeng Han, Yanbo Wang and Liyuan Han, Efficiency progress of inverted perovskite solar cells, Energy Environ. Sci., 2020,13, 3823-3847. 23.37%は論文値であり公式効率ではない。

図2にはセル構造、ペロブスカイトの組成も併せて示す。ペロブスカイト太陽電池には図3に示すように光入射側からn層/PVK/p層が形成されるNormal structure(順構造)とp層/PVK/n層からなるInverted structure(逆構造)がある。前者はn型半導体として無機酸化物が用いられる場合が多く高い効率を得られるが薄膜形成に400-500°C程度の高温が必要であることもある。一方後者はすべてのプロセスが100°C程度の低温プロセスで作製でき、タンデム形成時のボトム層へのダメージ、プラスチック基板への薄膜形成に有利である。図4に従来のPb-ペロブスカイト太陽電池の逆構造ペロブスカイ

ト太陽電池の効率推移を示す。現在、Pb-ペロブスカイト太陽電池の論文報告として 23.37%が最高値であるが、我々の狭バンドギャップ SnPb ペロブスカイト太陽電池の効率はこの Pb ペロブスカイト太陽電池の最高効率に並ぶ高性能を有している。

②円筒形太陽電池の開発

新しい市場と太陽電池産業のゲームチェンジを目指して円筒形太陽電池の開発を産学連携で進めてきた。円筒形太陽電池にはこれまでのフラットな太陽電池と異なり、垂直設置などの設置の自由度が

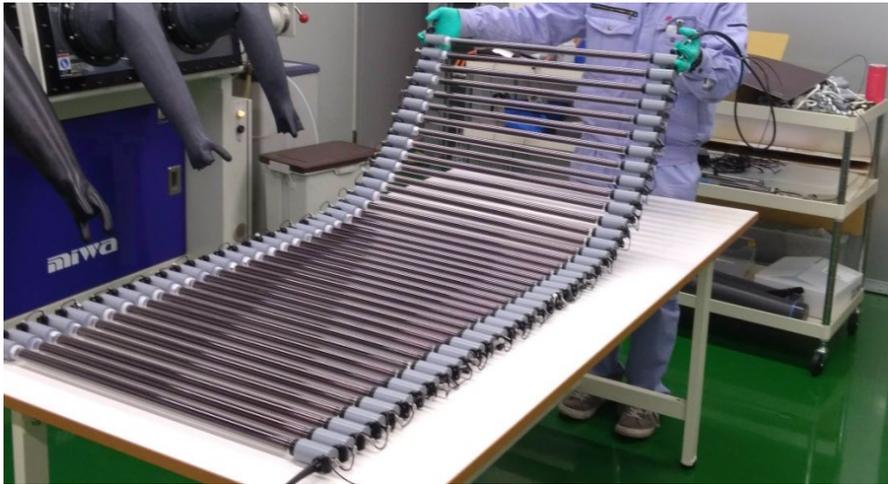


図5 セミフレキシブル円筒形太陽電池モジュール（株式会社フジコー、CKD 株式会社、ウシオ電機株式会社、電気通信大学共同）

あり、軽量で運搬しやすくハンドリングが容易であること、および一日の発電量がフラットな太陽電池よりも多いという消費者側の利点がある。一方、生産者側から見れば、円筒形で容易に完全封止できるため低温で作製されるペロブスカイト光電変換層を酸素、湿度から完全に保護でき耐久性の高い太陽電池を低コストで供給することができる。円筒形太陽電池の完成には円筒形封止技術とフレキシブル光電変換技術の融合が必須である。円筒形封止技術はフレキシブルアモルファスシリコンを用いて問題点を解決してきた。現在、30cm、60cm、90cm、120cmのセル、モジュールが企業との共同研究で作製され、今年3月には九州工業大学・戸畑キャンパスに太陽電池モジュールシステムとして設置される。一方、この太陽電池の発電量を3倍に上げるべくフレキシブルペロブスカイト太陽電池の高効率化を検討してきた。狭バンドギャップ SnPb ペロブスカイト太陽電池では世界のトップ水準である。

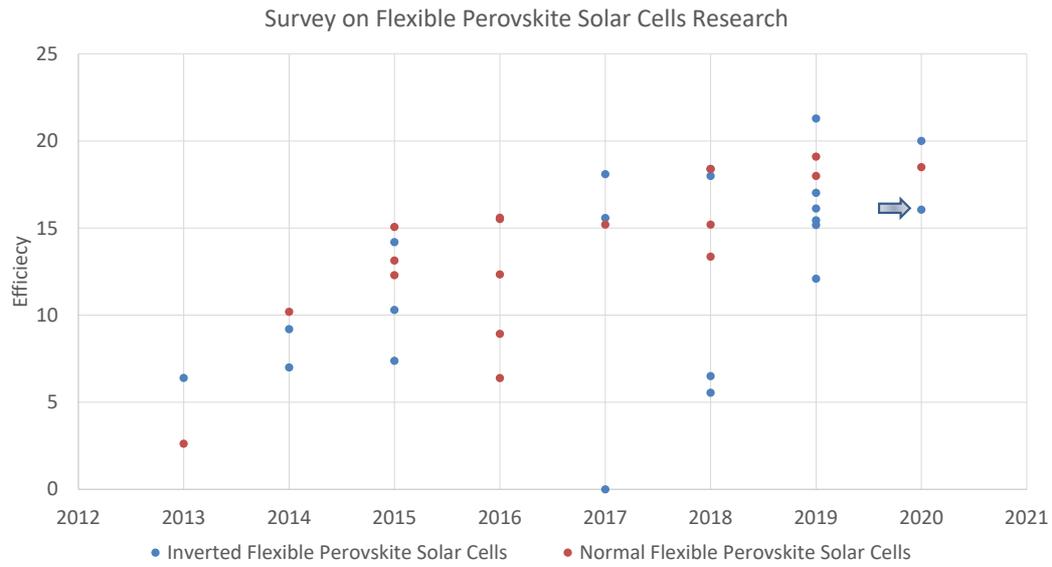


図6 フレキシブルペロブスカイト太陽電池効率の世界動向
矢印は我々のデータ

しかし、Pb-ペロブスカイトを含めたフレキシブルペロブスカイト太陽電池の世界動向（図6）を見ると効率20%を超える太陽電池も報告されており、さらなる高効率化が必要である。

以上

2020 年度 論文発表 (共同研究を含む)

1. Abduheber Mirzehmet, Tomoki Ohtsuka, Syed A. Abd. Rahman, Takumi Aihara, Muhammad Akmal Kamarudin, Shahrir Razey Sahamir, Shuzi Hayase, Tomoki Yuyama, Peter Kruger, Hiroyuki Yoshida, Surface structure of quasi-2D perovskite PEA₂mMAN-mPbnI₃n (n>>m), 2021 Appl. Phys. Express 14 031006.
2. 早瀬修二、 硫酸と工業、イオン元素を利用したペロブスカイト太陽電池の安定性と性能向上、2020, 73, 88-94.
3. Hirotani, Daisuke; Nishimura, Kohei; Hamada, Kengo; Kamarudin, Muhammad; Iikubo, Satoshi; Shen, Qing; Toyoda, Taro; Hayase, Shuzi, Relationship between perovskite solar cell efficiency and lattice disordering, Jpn. J. Appl. Phys. 2021, 60 035001.
4. Fan Zhang, Qingxun Huang, Jun Song, Shuzi Hayase, Junle Qu, Qing Shen, A New Strategy for Increasing the Efficiency of Inverted Perovskite Solar Cells to More than 21%: High - Humidity Induced Self - Passivation of Perovskite Films, Solar RRL, 2020, 4, 2000149. 2020.
5. Yaohong Zhang, Guohua Wu, Chao Ding, Feng Liu, Dong Liu, Taizo Masuda, Kenji Yoshino, Shuzi Hayase, Ruixiang Wang & Qing Shen. Surface-Modified Graphene Oxide/Lead Sulfide Hybrid Film-Forming Ink for High-Efficiency Bulk Nano-Heterojunction Colloidal Quantum Dot Solar Cells. Nano-Micro Lett. 2020, 12, 111. <https://doi.org/10.1007/s40820-020-00448-8>.
6. Yaohong Zhang, Shuhei Ozu, Guohua Wu, Chao Ding, Feng Liu, Dong Liu, Takashi Minemoto, Taizo Masuda, Shuzi Hayase, Taro Toyoda, and Qing Shen, In-Depth Exploration of the Charge Dynamics in Surface-Passivated ZnO Nanowires, J. Phys. Chem. C 2020, 124, 29, 15812–15817.
7. Ding, C.; Liu, F.; Zhang, Y.; Hirotani, D.; Rin, X.; Hayase, S.; Minemoto, T.; Masuda, T.; Wang, R.; Shen, Q, Photoexcited hot and cold electron and hole dynamics at FAPbI₃ perovskite quantum dots/metal oxide heterojunctions used for stable perovskite quantum dot solar cells, Nano Energy, 2020, 67, 104267.
8. Hirotani, D., Maeda, Y., Kamarudin, M. A., Shen, Q., Toyoda, T., & Hayase, S. The effect of p/n junction position on perovskite solar cell efficiency by changing polarity of perovskite layer. Jpn. J. Appl. Phys. 2020, 59 061005.
9. Near-Infrared Emission from Tin–Lead (Sn–Pb) Alloyed Perovskite Quantum Dots by Sodium Doping, Feng Liu, Junke Jiang, Yaohong Zhang, Chao Ding, Taro Toyoda, Shuzi Hayase, Ruixiang Wang, Shuxia Tao, Qing Shen, Angewandte Chemie, 2020, 132, 8499-8502.
10. Shuhei Ozu, Yaohong Zhang, Hironobu Yasuda, Yukiko Kitabatake, Taro Toyoda, Masayuki Hirata, Kenji Yoshino, Kenji Katayama, Shuzi Hayase, Ruixiang Wang and Qing Shen, Improving Photovoltaic Performance of ZnO Nanowires Based Colloidal Quantum Dot Solar Cells via SnO₂ Passivation Strategy, Front. Energy Res., 20 February 2019 | <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00011>.
11. Md. Zaman Molla, Ajay K. Baranwal, Shuzi Hayase, Shyam S. Pandey, "Effect of electrolyte for back contact transparent conducting oxide-less dye-sensitized solar cells: iodine versus cobalt," J. Photon. Energy, 2020, 10(4), 045501.
12. Seojun Lee, Janghyuk Moon, Jun Ryu, Bhaskar Parida, Saemon Yoon, Dong-GunLee, Jung Sang Cho,

- Shuzi Hayase, Dong-Won Kang, Inorganic narrow bandgap CsPb_{0.4}Sn_{0.6}I_{2.4}Br_{0.6} perovskite solar cells with exceptional efficiency. *Nano Energy*, 2020, 77, 105309.
13. Chao Ding, Feng Liu, Yaohong Zhang, Shuzi Hayase, Taizo Masuda, Ruixiang Wang, Yong Zhou, Yingfang Yao, Zhigang Zou, and Qing Shen, Passivation Strategy of Reducing Both Electron and Hole Trap States for Achieving High-Efficiency PbS Quantum-Dot Solar Cells with Power Conversion Efficiency over 12%, *ACS Energy Lett.* 2020, 5, 3224–3236.
 14. Mengmeng Chen, Shahrir R. Sahamira, Gaurav Kapil, Ajay K. Baranwala, Muhammad Akmal Kamarudin, Yaohong Zhang, Kohei Nishimura, Chao Ding, Dong Liu, Daisuke Hirotsu, Qing Shen, Shuzi Hayase, Inverted CsPbI₂Br perovskite solar cells with enhanced efficiency and stability in ambient atmosphere via formamidinium incorporation, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 218, 2020, 110741.
 15. Feng Liu, Junke Jiang, Yaohong Zhang, Chao Ding, Taro Toyoda, Shuzi Hayase, Ruixiang Wang, Shuxia Tao, and Qing Shen, Reviving Near-Infrared Emission for Sn-Pb Alloyed Perovskite Quantum Dots by Sodium Doping, *Angew. Chem.*, 131, 1-5, 2020, <https://doi.org/10.1002/ange.201916020>. (IF:11.69).
 16. Feng Liu, Yaohong Zhang, Chao Ding, Kentaro Kawabata, Yasuha Yoshihara, Taro Toyoda, Shuzi Hayase, Takashi Minemoto, Ruixiang Wang, Qing Shen. Trioctylphosphine Oxide Acts as Alkyl Halide for SnX₂/PbX₂: A General Synthetic Route to Perovskite AS_nPb_{1-x}X₃ (A= Cs, FA, MA; X= Cl, Br, I) Quantum Dots. *Chem. Mater.* 2020. 32. 3. 1089-1100.
 17. Molla, Md. Zaman; Baranwal, Ajay; Hayase, Shuzi; Pandey, Shyam, Boosting the efficiency of Low cost T-C-O-less Dye-Sensitized Solar Cells employing nanoparticle spacer and Cobalt complex redox shuttle, *ACS Appl. Electron Mater.*, 2020, 2, 9, 2721-2729.
 18. Md. Zaman Molla, Ajay Kumar Baranwal, Gaurav Kapil, Shuzi Hayase, Shyam S. Pandey, of Back-Contact T-C-O-free Dye-Sensitized Solar Cells employing Indoline and Porphyrin sensitizer based on Cobalt Redox Electrolyte, *Solar Energy*, 2020, 208:411-418.
 19. Jena, Ajay; Ishii, Ayumi; Guo, Zhanglin; Kamarudin, Muhammad Akmal; Hayase, Shuzi; Miyasaka, Tsutomu, Journal: *ACS Applied Materials & Interfaces*, "Cesium Acetate-Induced Interfacial Compositional Change and Graded Band Level in MAPbI₃ Perovskite Solar Cells", *ACS. Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12, 30, 33631-33637.
 20. Kyung-Su Nam, Suvratha Krishnamurthy, Shen Qing, Taro Toyoda, Kenji Yoshino, Takashi Minemoto, Tingli Ma, Shyam Pandey, and Shuzi Hayase, Stability improvement of perovskite solar cells by adding Sb-xanthate to precursor solution, *Physica Status Solidi (a), Applications and Materials Science*, 2020, 217, 2000144.
 21. Yaohong Zhang, Guohua Wu, Chao Ding, Feng Liu, Dong Liu, Taizo Masuda, Kenji Yoshino, Shuzi Hayase, Ruixiang Wang, Qing Shen, Surface-Modified Graphene Oxide/Lead Sulfide Hybrid Film-Forming Ink for High-Efficiency Bulk Nano-Heterojunction Colloidal Quantum Dot Solar Cells, *Nano-Micro Lett.* 2020, 12, 111.
 22. Guo, Zhanglin; Jena, Ajay; Takei, Izuru; Kim, Gyu Min; Kamarudin, Muhammad Akmal; Sanhira, Yoshitaka; Ishii, Ayumi; Numata, Youhei; Hayase, Shuzi; Miyasaka, Tsutomu, "Voc over 1.4 V for amorphous tin oxide-based dopant-free CsPbI₂Br perovskite solar cells" *JACS*, 2020, 142, 21, 9725-

9734.

23. Bhaskar Parida, Saemon Yoon, Jun Ryu, Shuzi Hayase, Sang Mun Jeong, and Dong-Won Kang, Boosting the Conversion Efficiency Over 20% in MAPbI₃ Perovskite Planar Solar Cells by Employing a Solution-Processed Aluminum³ Doped Nickel Oxide Hole Collector ACS Materials and Interfaces, (2020) 12, 20, 22958–22970.
24. Kohei Nishimura, Muhammad Akmal Kamarudin, Daisuke Hirotani, Kengo Hamada, Qing Shen, Satoshi Iikubo, Takashi Minemoto, Kenji Yoshino, Shuzi Hayase, Lead-free Tin-halide Perovskite Solar Cells with 13% Efficiency" Nano Energy, 2020, 74, 104858.
25. Hamada, Kengo; Tanaka, Ryo; Kamarudin, Muhammad Akmal; Shen, Qing; Iikubo, Satoshi; Minemoto, Takashi; Yoshino, Kenji; Toyoda, Taro; Ma, Tingli; Kang, Dong-won; Hayase, Shuzi, Enhanced device performance with passivation of the TiO₂ surface using a carboxylic acid fullerene monolayer for a SnPb perovskite solar cell with a normal planar structure, ACS Appl. Mater. Interfaces 2020, 12, 15, 17776-17782.
26. Tsuguo Koyanagi, Gaurav Kapil, Yuhei Ogomi, Kenji Yoshino, Qin Shen, Taro Toyoda, Takuro N. Murakami, Hiroshi Segawa, Shuzi Hayase, Hot-injection and ultrasonic irradiation syntheses of Cs₂SnI₆ quantum dot using Sn long-chain amino-complex, J Nanopart Res, 2020, 22:69.
27. Ajendra Kumar Vats, Anusha Pradhan, Shuzi Hayase, Shyam S. Pandey, Synthesis, photophysical characterization and dye adsorption behavior in unsymmetrical squaraine dyes with varying anchoring groups, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2020, 394, 112467. (IF:3.26).
28. Chi Huey Ng, Kengo Hamada, Gaurav Kapil, Muhammad Akmal Kamarudin, Zhen Wang, Satoshi Iikubo, Qing Shen, Kenji Yoshino, Takashi Minemoto and Shuzi Hayase, Reducing traps density and carriers concentration by Ge additive for an efficient quasi 2D/3D perovskite solar cell, J. Mater. Chem. A, 2020,8, 2962-2968.

2020 年度 招待講演

1. Invited: Shuzi Hayase, Pb free Sn-perovskite solar cells with over 13% efficiency, SPIE, Oral Video Presentation, 2020/8/24-28.
2. Planary: Shuzi Hayase, Sn Perovskite solar cell-present and future- The 2nd International Conference on Future Technology and Disruptive Innovation & The 310th China Engineering Science and Technology Forum. WEB. 2020/10/30.
3. Invited, Shuzi Hayase, Progress in perovskite solar cell, 11th International. Symposium on Organic Molecular Electronics, ISOME2020 WEB Aichi Ins. Tech. 8/7, 2020.
4. Invited, Shuzi Hayase, Sn Based Perovskite Solar Cells on Glass Substrate and Plastic Substrate, H02-1862/PRiME · 2020/10/6/WEB.

5. Invited, Kohei Nishimura, Muhammad Akmal Kamarudin, Daisuke Hirotsu, Kengo Hamada, Qing Shen, Satoshi Iikubo, Takashi Minemoto, Kenji Yoshino, Shuzi Hayase, Enhancement of Efficiency for Pb Free Perovskite Solar Cells Consisting of Sn²⁺ Doped with Ge²⁺, MRS Fall meeting, 2020/12/1.
6. Invited, Shuzi Hayase, Solar cells consisting of tin perovskite as light harvesting layer. nanoGe Spring Meeting 2021 March 9th 10:45h - 11:05h CET (18:45-19:05 (Japan time)) Abstract ID: 079.
7. Invited. 早瀬修二 プリントブル・ペロブスカイト太陽電池研究の現状と将来動向、第 169 総研セミナー・次世代の太陽電池発電システム 1/20. 2021 (WEB).
8. Invited 早瀬修二 Sn 系ペロブスカイト太陽電池研究の現状、日本太陽光発電学会ペロブスカイト太陽電池分科会、(共催：有機系太陽電池技術研究組合) 日時：2021 年 2 月 12 日 (金) WEB.
9. 招待講演： 早瀬修二 Pb free Sn ペロブスカイト太陽電池の研究開発動向, 応用物理学会・多様な安定相のエンジニアリングの新展開・2020/9/8/WEB.
10. 招待講演 早瀬修二 鉛フリー錫系ペロブスカイト太陽電池の研究開発動向電子情報・電気学会連載研究会 2021/3/1 13:10-13:50

2.主要研究成果

2.4 溶融塩炉フリーズプラグに関する研究

大川 富雄教授

情報理工学領域 II 類/知能機械工学科/機械知能システム学専攻

計測・制御システム 兼務

1. 溶融塩炉フリーズプラグに関する研究

地球温暖化抑制の観点から、二酸化炭素排出量の少ない発電システムによる電力供給が、全世界的に求められている。これを受けて、我が国では、2018年7月に第5次エネルギー基本計画を策定し、2030年時点で、全電力のうちの20~22%を原子力発電でまかない、水力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーによる分とあわせて、ゼロエミッション電源による発電割合を44%以上にすることを目標に据えた。これは、2011年以前の目標であった70%より大幅に低い数字であり、地球環境保全の観点で必ず達成すべき目標と言える。しかしながら、2019年における発電割合は、原子力6.5%、水力7.4%、その他の再生可能エネルギー11.1%であり、ゼロエミッション電源による発電割合は25%に止まっている。これより、我が国が地球環境保全の責任を果たすためには、安全性に優れた原子力発電システムの開発を進める必要がある。本研究では、本学の提携校であるインドネシアのバンドン工科大学より博士後期課程学生（Muhamad Ilham 君）と研究生（Raka Firman Baskara Permana 君）各1名を迎え、次世代原子力システムとして期待されている溶融塩炉の静的安全系であるフリーズプラグの動作特性と安全性に優れた新型軽水炉特有の熱流動現象について、実験と解析の両面から検討を進めた。本稿では、溶融塩炉フリーズプラグに関する研究成果を紹介する。

溶融塩炉は、第IV世代原子炉として開発が進められている6種類の主要な次世代炉の一つで、高沸点の溶融塩に核燃料物質に溶解させた液体状の燃料を使用することに特徴がある。このため、燃料の成型加工が不要、燃料交換不要、低圧で運転できるなどの優れた特徴がある。安全性の観点では、炉心の下部に静的安全系であるフリーズプラグを配置している。フリーズプラグは、通常運転時には外部冷却されており、内部の塩が凍結状態にある。電源喪失などの事故時に外部冷却が停止すると、塩が融解して、炉内の溶融塩がダンプタンクに排出され、核反応が自動的に停止する。このため、外部から操作すること無しに、炉停止が可能である。ただし、フリーズプラグが静的安全系として機能するためには、外部冷却喪失後、十分に短時間で開となる必要がある。フリーズプラグの開時間は、凝固塩の溶融プロセスのほか、初期状態における凝固塩の形状と温度分布にも依存する。したがって、フリーズプラグの開時間を評価する上では、塩の凝固過程と溶融過程を一貫して解析する必要がある。2020年度は、フリーズプラグの内径、壁面厚さ、設置角度などが、フリーズプラグの動作特性に及ぼす影響を数値解析的に調査した。

フリーズプラグの内径を24~100mmの範囲で変化させたときの凝固完了時におけるフリーズプラグ内の温度分布と弁開となったときの相分布を図1に示す。凝固完了時における中心温度は、フリーズプラグ内径の増加とともに上昇傾向であることがわかる。表1は、フリーズプラグの内径による開閉時間解析結果のまとめである。本表より、閉時間と開時間の両方が、フリーズプラグの内径の増加とともに増加する傾向であることがわかる。

フリーズプラグの性能を考える上で重要なもう一つの要素は、フリーズプラグが開となってから炉容器中の溶融塩の排出に要する時間である。フリーズプラグの内径が、開時間と溶融塩排出時間に及ぼす

影響を図 2 に示す。本図より、フリーズプラグの内径の増加とともに開時間は増加傾向、一方排出時間は減少傾向となる。この結果、溶融塩炉の安全性を考える上で重要となる開時間と排出時間の合計は、内径 50mm 程度で最少となることがわかる。これは、安全性に優れた溶融塩炉の設計を行う上で貴重な情報と言える。

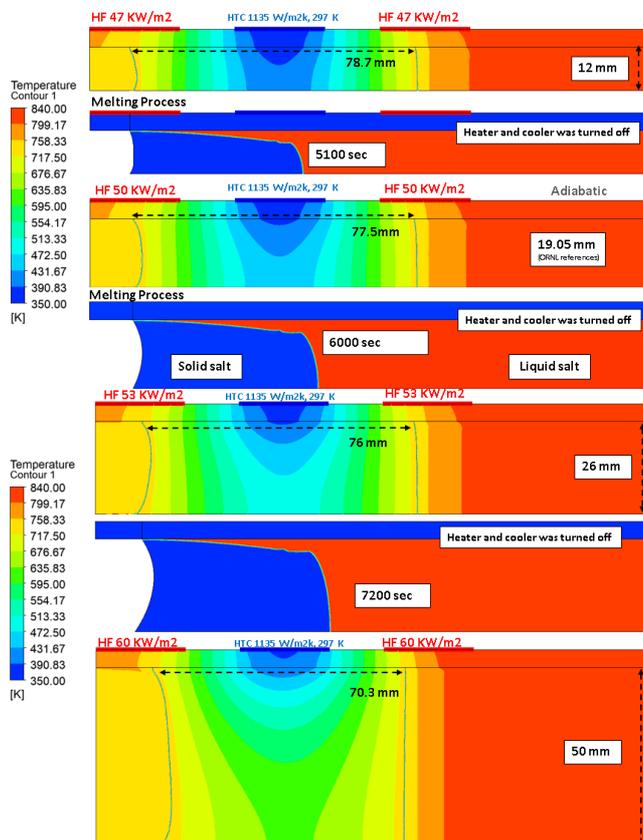


図 1 フリーズプラグの内径による凝固完了時の温度分布と弁開となったときの相分布

表 1 フリーズプラグの内径による開閉時間の変化

Inner diameter (mm)	Heater Heat Flux (KW/m ²)	Plug Length (mm)	Closed time (sec)	Steady time (sec)	Mean temperature (K)	Opening time (sec)
24	47	78.7	400	3300	539	5100
39.1	50	77.5	900	4200	553	6000
52	53	76	1800	6000	569	7200
100	60	70.3	6900	10200	629	15600

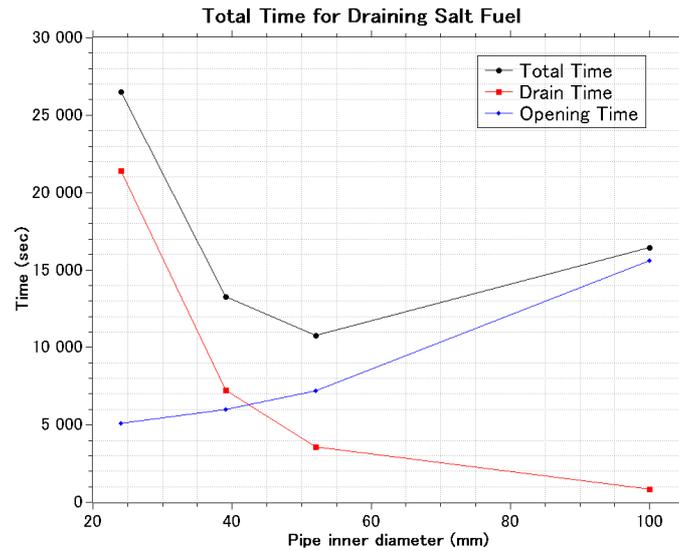


図2 フリーズプラグの内径が開時間と溶融塩排出時間に及ぼす影響

2. 研究実績

研究論文

- 1) Indarta Kuncoro Aji, Tatsuya Tatsuya, Motoyasu Kinoshita, Tomio Okawa, “An experimental and numerical study of wall effect on freeze valve performance in a molten salt reactor”, Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 6/ 2, 21105 (2020).

国際会議プロシーディングス等

- 1) Muhammad Ilham, Tomio Okawa, “Numerical Investigation of Safety System Parameters in Molten Salt Reactor: Wall Effect on Freeze Valve Opening Time”, Proceedings of 28th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE28), ICONE28-64134 (2021).
- 2) Tomio Okawa, Tatsuya Tokushima, Indarta Kuncoro Aji, and Mahammad Ilham, “Study on melting process of solid salt contained in metal vessel”, Advances in Thermal Hydraulics (ATH '20), (2020).

2.主要研究成果

2.5 再生可能エネルギー・ソリューションプラットフォームの研究

市川晴久 特任教授

I. 2020 年度計画概要

本研究では、当研究センターメンバが参加する科研費挑戦的研究（開拓）を推進し、その成果を活用して、産学連携で再生可能エネルギー・ソリューションプラットフォーム確立を狙うソリューション研究を展開する。世界共通の課題となっている、2050 年までの再生可能エネルギー電力 100%化を目指し、研究成果が電力システムアーキテクチャ提案につながるように以下の課題を検討する。

(1) ユーザ主導インターネット型マイクログリッドに関する研究

- ・ 電力網ゼロエミッション化加速のためのユーザ主導インターネット型電力インフラアーキテクチャ
- ・ バーチャルグリッドシステム構成法

(2) 太陽光発電電力の地産地消に関する研究

II. 研究実施状況

(ア) ユーザ主導インターネット型マイクログリッドに関する研究

(1) 電力網ゼロエミッション化加速のためのユーザ主導インターネット型電力インフラアーキテクチャ

前年度のバーチャルグリッドハブ (VG-Hub) プロトタイプの開発により、バーチャルグリッドシステム構想の具体像を示すことが可能になった。この成果を基礎とし、再生可能エネルギー主体への電力インフラシフトに貢献すべく、バーチャルグリッドシステム研究戦略を深める活動として、下記を実施した。

- ・ 関連研究開発の調査
 - スマートグリッド、マイクログリッドの動向と課題
 - Energy Internet 研究とバーチャルグリッドシステムの関係
- ・ DC 負荷の動向と課題調査

スマートグリッド、マイクログリッドの動向と課題

再生可能エネルギーを主力エネルギー源とする電力インフラにおいては、分散発電が主体となり、従来の集中型発電所や送配電網の役割が大きく変わり、電力事業も大きく変化すると予想される。2020 年 10 月には日本政府も 2050 年までのカーボンニュートラル実現を宣言した。カーボンニュートラルの実現には、電力エネルギー源の再生可能エネルギー化、電力利用の効率向上・省エネルギー化に加え、広く暮らしや経済活動に必要なエネルギー源を電力に置き換えることが必要なため、必要な電力量は現在よりも大きくなる可能性が高い。スマートグリッド、マイクログリッドの研究開発では、再エネ電力比率の拡大、災害に対するレジリエンス向上、省エネルギー化を目標としているものの、前提とする再エネ電力比率の大幅な拡大、想定する電力負荷の大きな変化などから、さらに多様な取り組みを模索する必要が考えられる。

マイクログリッドは、マイクログリッド内の再エネ電力の変動をマイクログリッド内に留め、電力系統の再エネ電力変動吸収に貢献し、電力系統障害時には系統から切り離して独立運転して電力供給の信頼性を高めることを目指している。マイクログリッドには、複数の発電機、太陽光発電システム、蓄電池などの多様な発電源と負荷を共通の電力バスに収容し、マイクログリッド内での電力供給負荷バランス制御を行う。このような仕組みを構築するには、周波数制御が不要な直流による電力バスが適しているため、直流の適用に関する研究開発も盛んである。マイクログリッドの導入には技術的な課題以外の障害がある。地域の共同体に向けたマイクログリッド事業は、小規模ではあるが、電力提供事業になるため、電力事業に関わる様々な規制を順守する必要がある。また、マイクログリッドは電力系統と接続し、電力の売買を行うため、電力会社が課す接続基準を満たす必要がある。事業収支に加えて、これらの規制を満たすことを含めた事業化判断と投資が必要である。このため、企業、大学、家庭などによる、電力提供者と需要家が一致する自営型のマイクログリッドの導入が先行している。導入動機は、電力コスト低減よりは、停電、災害対策が優先されている。IEAは、2024年までの新設太陽光発電システムの3/4は分散地産地消型になると推定している。このように、電力インフラ変革は、電力事業者主導よりは、ユーザ主導で進む傾向が顕著である。

Energy Internet 研究とバーチャルグリッドシステムの関係

ユーザ主導での社会インフラシフトを我々はインターネットで経験している。電話網事業者がデータ通信を含む高度マルチメディア通信サービスを追求していたのに対して、インターネットは、コンピュータ通信に特化し、ユーザ網を相互接続してインフラを作る草の根型のアーキテクチャによって成長し、電話網を凌駕し飲み込んでしまった。半導体技術や光通信技術などの指数関数的性能向上と、オープンソースによる無数のボランティアによる技術開発がこのインフラシフトを支えた。電力インフラについても、状況について、電話サービスインフラとの多くの類似点を見出すことができる。

インターネット的なものへの注目から、Energy Internet (EI)と呼ばれる研究分野が成立している。EIでは、電力バスに接続する電源装置、負荷の脱着のためのPlug & Playインタフェース、脱着に伴う電源及び負荷の変動吸収メカニズムを備えたマイクログリッド、マイクログリッド間の広域での電力共有などが研究されている。EIの諸研究とバーチャルグリッドシステム(VGS)との類似点は多いが、次の点で大きく異なっている。

- ・ EIは電力の安定供給、品質向上を目指しているのに対し、VGSは電源と負荷を含むアプリケーションシステムを、ユーザ要求を満たすように制御することを目指している。
- ・ このため、EIは電力確保のために、電力系統との接続を基本とするが、VGSは、限られた電力をユーザ要求に合わせて負荷に分配すること、あるいはデマンドレスポンスを内蔵することを基本としており、電力系統との接続を基本としていない。
- ・ むしろ、VGSは電力系統から切り離された状態を基本とし、アプリケーションシステムの移動や仮設を支援することを想定している。

DC 負荷の動向と課題

電話網が目指した次世代サービスが、データ通信を含みつつも、TV電話に代表されるマルチメディア通信サービス、高度化電話サービスであったのに対し、インターネットはコンピュータ通信のためのネットワークとして開発された。コンピュータ通信は、当時のマイナーな新サービ

スであり、インターネットは電話網を置き換えていく社会インフラを目指すネットワークではなかった。そのために、電話網事業者が負っていた責任を必ずしも負う必要がなかった。例えば、全国一律にサービス提供する義務を負う必要がなかった。新しい未熟なインフラが、既に確立されているインフラと同レベルでサービス提供する制約は新インフラの成立を困難にする。上述したマイクログリッド導入の困難もこのような事情が大きな原因のひとつと考えられる。また、マイクログリッドの実現には直流が適しているが、負荷の接続には不都合な場合が多い。多くの負荷は内部では DC 駆動であるが、AC 電源との接続を前提にしてきているので、電源インタフェースは AC がほとんどであり、直流マイクログリッドのメリットを引き出せる負荷が揃わない。しかし、一部応用領域では、新しい DC 負荷が誕生し増殖している、新たな端末であるコンピュータに対する通信サービスを提供するインターネットが新たな通信インフラに成長したように、新たな DC 負荷に対する電力サービスを汎用的に提供するシステムが新しい電力インフラに成長する可能性が考えられる。

発展途上国では、膨大な DC 負荷市場が生まれつつある。特に 10 億人近くが居住する無電化地帯では、極めて小規模、簡易な太陽光発電システム SHS (Solar Home System) の導入が進行中であり、その負荷は LED 照明、スマホ充電、TV などの DC 負荷である。今後、さらに多種類の高度な負荷を利用できるように SHS を高度化、大規模化する需要が想定される。一方、電力網が充実している先進国では、蓄電池内蔵の DC 負荷が注目される。蓄電池の性能向上は、PC、スマホ以外にも新しい応用機器を続々と生み出している。図 1 に市場を拡大しつつある蓄電池駆動負荷を示す。蓄電池駆動機器は DC 駆動が基本である。蓄電池駆動にする理由は機器のモビリティ実現であることから、図では、蓄電池駆動負荷を、モビリティの程度と個人ユースと法人ユースの違いに応じて配置している。PC、スマートフォンなどのモバイル ICT 機器は通信産業をけん引している。輸送分野では、EV 以外にもパーソナルビークルなど多様な移動機器の開発が盛んである。ロジスティクス分野では AGV などのロボットの普及が加速している。被災時のための非常用電源システムを蓄電池主体に構成する製品も多くなってきている。

蓄電池駆動機器の中には、給電サービスを自らの分野で創出しようとする動きが散見される。

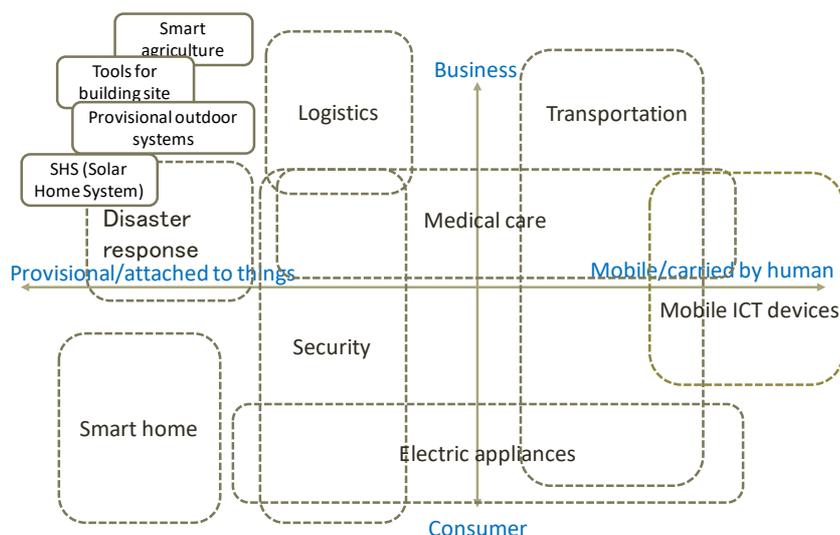


図 1 市場を広げつつある蓄電池駆動負荷

スマートフォンに対して、充電用ポータブル電池サービスを展開する事業者が世界各国に登場している。スマートフォンと同様に移動機器分野では、移動中の電池切れが問題になる。電気自動車の充電に関しては充電ステーションインフラの開発が進められている。台湾の Gororo 社は、自社電動スクーターに対して、充電済み電池を提供する充電ステーションインフラサービスを台湾全土に配置することに成功している。Gororo の事業は、電動スクーターを販売する代わりに、充電済み電池提供を含む電動スクーターレンタルサービスを提供する点に特徴がある。また、インターネット通販を裏で支えている大型ロジスティクスセンターでは、物品棚を移動させる自律走行ロボット（AGV： Automated Guided Vehicle）が活躍している。AGV の充電方式には、AGV が自律的に充電ステーションに戻って充電する Opportunity Charging 方式、充電済み電池を交換する方式などがあり、実装導入され、研究開発も盛んである。AGV は、道路を走行する各種の運搬ロボット、乗り物ロボットと同根であり、充電方式は規模の拡大とともに社会インフラの性格を帯びる可能性がある。これらの充電システムの課題は、電池の形状を含む規格化を前提にしており、さらなる発展には、充電ステーションの分割損、投資リスク拡大を防止するための汎用インフラ化が望まれる。

GIGA スクール用タブレット保管庫の機能改善と地域電力供給レジリエンス向上

大量のタブレットに対する充電システムの必要性が急速に高まっている。2019年12月、文部科学省は、児童生徒1人1台のタブレット端末を配布することを閣議決定し、いわゆる GIGA スクール構想が実現に向けて動き出した。2020年2月からのコロナ禍の顕在化により、必要性が一気に高まり、その大きな課題の一つとしてタブレット充電が課題となった。学校は、災害時には避難所としても活用されることが多いため、平時のタブレット活用と避難所運営における電源問題は、新たな電力インフラを先導する具体的な DC 電力応用を内在している可能性が高いと考えられる。このため、昨年度末、都内の中学、高校のヒヤリングを実施し、以下の知見を得た（詳細は補足情報を参照）。

- ・給充電対象となるタブレット、PC の数が膨大
- ・タブレット活用が進むにつれて給充電問題が大きくなる。
- ・タブレット使用場所の自由度が必要。
- ・PV 活用、学校の災害時機能については開発余地が大きい。

大量のタブレット充電は、GIGA スクール実施においてすぐに直面する課題であるため、多数の企業がタブレット充電保管庫と呼ばれる製品を販売開始し、文科省も充電保管庫標準仕様書を制定し、普及を指導している。このため、充電保管庫の大量タブレット充電ソリューションである「輪番充電」とその課題を調査した。教室の電源容量が 100VAC, 20A 程度しかなく、また、学校全体の電源容量も限られているため、大量のタブレットを同時に充電できない。輪番充電機能とは、タブレット充電電力が電源容量に収まるように、順番に充電する機能である。AC コンセント経由で充電制御するため、タイマーで AC コンセントの ON/OFF するような仕組みしか作れず、個別タブレットを認識して各タブレットの状態を考慮した充電制御を行うことはできない。また、授業に間に合うように充電するなどの自動化も困難である。タブレット使用場所の自由度を確保するための給電を支援することもできない。

ヒヤリングでは、GIGA スクール実現の動きと、災害時の学校が果たす地域レジリエンス向上との関係を見出すことはできなかった。しかし、脱炭素と重要な社会問題の同時解決を目指す動きは活発である。このような動きの一つである、東工大先進エネルギーソリューション研究センターが進めている調布駅再開発検討会に参加し、調布駅前の再開発を脱炭素、職住接近、災害レジリエンス強化、高齢化対策に結び付けようとする計画において我々のソリューションを検討中である。

以上の検討に基づき、バーチャルグリッドシステムを用いて、新たに登場、拡大中の各種 DC 負荷のためのユーザ主導インターネット型マイクログリッドを構築し、既存スマートグリッド、マイクログリッド構築アプローチを補完し、カーボンニュートラル実現の加速を目指す戦略を提案し、企業との共同研究を開始した。

捕捉情報：学校ヒヤリングにより収集した GIGA スクール実現に関わる課題

- ・タブレットあるいは PC の数量が膨大：500 以上（生徒 500 人+教職員）
- ・充電方法と課題
 - 生徒が自宅で充電するのが基本。
 - 授業の途中で電池切れになることがある。
 - 充電カートを利用。
 - 生徒のスマホ充電を認めない。
- ・タブレットの使用場所と給電の課題
 - 反転学習のため自宅で使う。
 - 運動場でも使う。
 - 教室の用途を変えようとするとう電源の問題があった。
 - アクティブラーニング教室でレイアウトの自由度を上げるのにバッテリー給電が便利。
- ・管理の手間がかからないことが重要
 - GIGA スクール運営専任職員体制は十分でない。
 - WiFi よりは LTE が便利。
- ・動画の教育効果は大きい
 - 体育の授業で効果大。踊りを録画して見るだけでできめに動きが良くなる。
 - ・学校の避難所機能，地域コミュニティとの関係
 - 災害対策は教職員の所管ではない。非常電源コンセント場所などが未周知。
 - 設備を地域コミュニティに貸し出す動きはまだない。
- ・PV が十分に活用できていない。充電に使えるといい。
- ・生徒の充電需要
 - 電動自転車で通学する生徒が増えた。電池が切れると大変。
 - 教室のフリー充電スポットの需要は大きい。

(2) バーチャルグリッドシステム構成法

バーチャルグリッドシステムの全体構成を図 2 に示す。バーチャルグリッド (VG) は、ユーザアプリケーションごとに動的に設定される電力システムで、ユーザの電源、負荷と、それらを接続して電力を流す VG-HUB ネットワークからなる電力システムである。VG-HUB は複数の USB-C PD ポートを有し、これに電源や負荷を接続することによって、VG-HUB 内部で電力の合成と分配をプログラム制御することが可能なデバイスである。ユーザは自分が管理する制御プログラムによって、自身の目的を達成すべく、VG 内の電力フローを制御する。VGS は、複数ユーザの VG を動的に生成し、ユーザの制御プログラムが必要とする、電源情報（蓄電池の充電状態、発電予測など）、負荷の消費電力予測情報などを提供する。このために、VGS は、VG-HUB と通信し、電源、負荷、VG-HUB の情報を常時収集、解析するためのクラウド上のソフトウェアシステムを持つ。VG-HUB は、固定数の USB-C PD ポートを有し、各ポートは最大 100W の電力を双

方向で流すことができる。

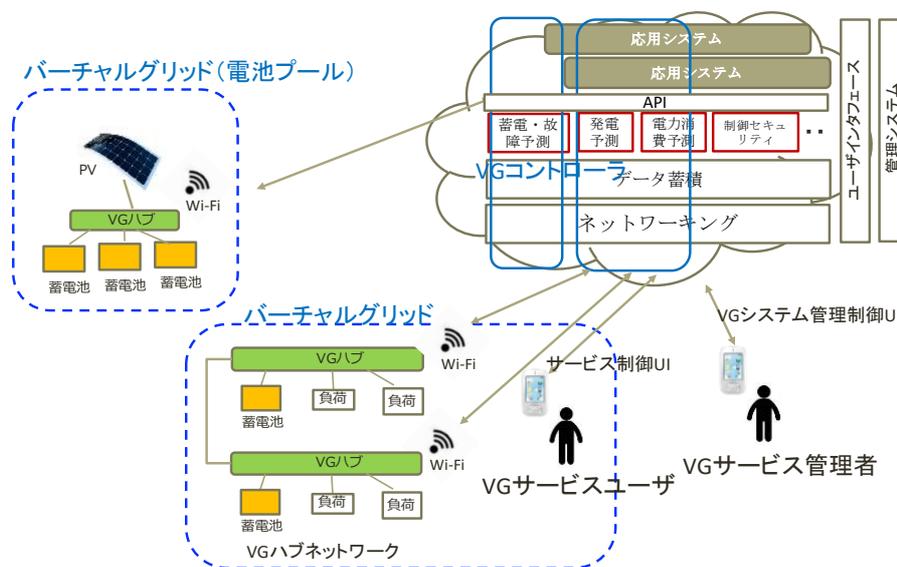


図 2 バーチャルグリッドシステム

VG-HUB の各ポートは電力フロー制御に関して対等であり、VG-HUB を USB-C ケーブルで接続して構成する VG-HUB ネットワークを大きな VG-HUB と見做したとき、VG-HUB のポート数及び制御可能な電力フロー総量を拡大できる。VG-HUB 間のリンク数を増やすことにより VG-HUB ネットワークを通過させる電力フロー量を増やすことができるが、電源デバイスや負荷デバイスを接続するポート数が減ってしまう。与えられた VG-HUB 数、VG-HUB 間の接続に使うポート数に対して構築される VG-HUB ネットワークが通過制御可能な電力フロー総量は、ネットワークトポロジーに依存する。この問題をグラフ構成問題として検討し、正則グラフで構成する問題を定式化し、性能を解析中である。

(イ) 太陽光発電電力の地産地消に関する研究

太陽光エネルギーは、地球上の広い地域で得ることができ、立地制約が少ないため、電力の地産地消に適用することが期待されている。電力を地産地消することにより、送配電コストを削減でき、災害時にも地域ごとに独立した電力供給を継続でき電力供給の信頼性を高めることができる。太陽エネルギーを電力消費地近辺でどの程度、電力に変換できるかを知ることは、カーボンニュートラル実現に向けて再構築される、電力インフラ、都市、人間生活の基本構造を設計するために極めて重要である。

従来、都市など、電力需要がある地域では、建物の屋根に太陽光発電パネルを設置することが行われてきている。しかし、屋根の面積には限りがあり、また、空調室外機などがあって、利用可能な屋根表面が制限されることが多い。このため、屋根以外の沿面活用が期待されており、特に壁面は面積が広く、潜在的な発電可能量は屋根よりも数倍大きいことが見積もられている。効率的な太陽光発電装置設置のためには、日照において有利な沿面を選択すべきである。この問題について企業との共同研究を開始し、下記を実施した。

- ・ 沿面発電技術の調査
- ・ 沿面発電量評価技術の調査
- ・ 3Dモデルによる沿面日射量シミュレーション評価システムの開発

沿面には屋根や壁面などの建物沿面以外に、農地、路面、河川敷、水面、公園などの地上面、車両表面など、多様な沿面がある。発電のための沿面選択では、沿面日射量、設置に適したPVとその発電性能、沿面の元来の利活用機能、沿面発電電力の利用価値、利用容易さなどを考慮する必要がある。NEDOの検討によれば、太陽光発電ポテンシャルは、建築物では、屋根よりも壁面の方が大きく、特に集合住宅のポテンシャルが大きい。建物以外では、耕作地のポテンシャルが380GWと最も大きく、耕作放棄地、湖沼・ダム水面、河川敷、駐車場も大きなポテンシャルを有する。NEDOの検討では道路面は対象とされていないが、路面も含め、上記の沿面への適用を目指すPVの開発、実証実験なども実施されている。高効率、低コスト、軽量で注目されているペロブスカイトPVなど、多様な沿面への適用が期待できるPVの研究開発も進んでいる。ポストン市内の路面についての研究では、平均的な交通流では交通量の影響をほとんど受けずに多くの車に供給可能な大量の電力を発電できる可能性が報告されている。

沿面発電量を地物への日照から計算するマイクロ解析手法では、GIS (Geographic information system)上で、地物を地図上に認識し、地物情報を含む3D地図情報に統合し、対象とする沿面への日照を求め、発電量を推定する。地物情報を含む3D地図情報構築、日照量解析では、必要な基礎データの入手、計算量が課題となり、課題解決のための各種アプローチが研究されている。

我々は、GISとして、Esri社のArcGISを用い、基礎データとして、航空LiDARデータ、国土地理院の基盤地図情報を用いて3D地図情報を生成し、気象庁の気象データを用いて日照量を解析するシステムを実装した。サンプル地域を選定し、単一建物について沿面発電量を解析する予備実験を行った。建物高低差、建物密度によらず、壁面発電量の方が建物天面よりも大きく、特に、建物高低差、建物密度が異なる区域について、シミュレーション解析を実行し、建物高低差大きく、周辺建物密度が低いケースについて壁面発電量が建物天面に比べて5.8倍の発電量であることを推定した。また、計算手法について特許を申請した。

III. 業績・成果一覧

国際会議 (2012/4/1-2021/3/31)

- 1) Yuusuke Kawakita, Hiroshi Tanaka, Haruhisa Ichikawa, and Jin Mitsugi; "Synchronous streaming protocol for back-scatter communications," IEICE International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC)(2020).
- 2) Kazuki Takaie, Kota Tamura, Yuusuke Kawakita, Shinji Yokogawa, Yoshito Tobe, and Haruhisa Ichikawa; "Toward efficient power delivery using USB Power Delivery hub," ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, P1-15 (Sensys 2020).
- 3) Kota Tamura, Yuusuke Kawakita, Yoshito Tobe, Shinji Yokogawa, Haruhisa Ichikawa, "Practical Issues in Aggregation and Distribution of Electrical Power Among USB-PD-Connected Devices," in Proc. Workshop on the Reliability of Intelligent Environments (WoRIE 2020), pp. 54-61, doi: 10.3233/AISE200024.

国内会議

- 1) 市川晴久, 横川慎二, 戸辺義人, 川喜田佑介: 超小型電力システムを単位に再構成可能なマイクログリッド, 第63回自動制御連合講演会, 2H4-1 (2020).
- 2) 川喜田佑介, 高家和暉, 田村光汰, 戸辺義人, 市川晴久, 横川慎二: USB-PDによるポリシーアウェアDCパワーネットワークキング, 第63回自動制御連合講演会, 2H4-2(2020).
- 3) 後川知仁, 武田隆, 中里諒, 横川慎二, 市川晴久: 特定地域における太陽光発電のポテンシャルに関する基礎的検討, 電子情報通信学会電子通信エネルギー技術研究会, EE2020-24(2021-01).
- 4) 中里諒, 野秋拓真, 横川慎二, 市川晴久, 後川知仁, 武田隆: 航空LiDARデータとGISソフトウェアを用いた太陽光発電における検討, 電子情報通信学会電子通信エネルギー技術研究会, EE2020-25(2021-01).
- 5) 高家和暉, 田村光汰, 戸辺義人, 川喜田佑介, 横川慎二, 市川晴久: USB-PDハブによる電力配信の効率化に向けた制御検討, 令和3年電気学会全国大会(2021.3)

特許

出願

- 1) 後川, 武田, 市川, 横川, 中里: 発電量推定装置, 特願2021-037410, 2021/3/9.

登録

- 1) 三次, 五十嵐, 市川, 川喜田, 江川: 無線通信システム, 特許第6726131(2020/6/30)
- 2) 三次, 宮澤, 市川, 川喜田, 江川: 測角装置, 特許第6718342(2020/6/16)

その他

- ・一般社団法人 電気通信協会 企画委員会 委員長
- ・一般社団法人 電気通信協会 コンテンツ・アプリケーション調査会委員長
- ・多摩ブルー・グリーン賞 副選考委員長

2.主要研究成果

2.6 研究 インフラ制御システムのセキュリティ機能開発

ーコントローラホワイトリストの自動生成手法とそのテスト方法の開発ー

澤田 賢治 准教授

情報理工学領域 II 類/知能機械工学科/機械知能システム学専攻

計測・制御システムプログラム兼務

2020 年度概要

電力システムを含むインフラ制御システムのセキュリティ機能開発として、コントローラホワイトリストの自動生成手法とそのテスト方法の開発を行った。特に、自動生成されたホワイトリストの正当性検証やモデル検証に注力し、異常検知精度の向上に努めた。また、セキュリティ機能の性能検証方法としてシミュレーション（双模倣性）と 3D シミュレータを利用した方法を開発した。前者は実システムの状態遷移を離散事象でモデル化し、実システムでは検証できないような攻撃を加えた時の振る舞い解析を実現した。後者は実システムに段階的に攻撃が加わる状況を再現し、攻撃検知と攻撃特定を実現するオートマトンモデルを構築した。本年度の報告では、双模倣性と 3D シミュレータに関する成果報告を行う。

1. 双模倣性を考慮したセキュリティ機能検証

産業用制御システム(ICS)はネットワーク化により利便性は向上したものの依然としてサイバー攻撃の脅威にさらされている[1]。制御システムを標的としたサイバー攻撃は 2010 年の「Stuxnet」を始めとし、2020 年に至るまで数多くの事例が報告されている[2]。制御システムは継続的な運用性能を表す可用性が重視されるため、サイバー攻撃の影響を完全に排除できない状況であっても運転を継続することが求められる[3]。すなわち、制御システムの可用性保持にはインシデントの回避策に加えてインシデント発生後のシステムの運用からなる多層防御が重要となる[4]。

我々はこれまでインシデント発生後のシステム運用として縮退運転制御を研究してきた[5-7]。縮退運転は対象システムにおける異常検知機能とシステムの制御構造の切り替えによる防御機能からなる。異常検知機能では、システムの振る舞いとシステムの正常モデルを比較し異常検知する(モデルベースセキュリティ[8])。防御機能では制御システムを外部ネットワークから切り離し、ローカル制御に縮退することで被害を最小限に抑える。

本研究の目的は先行研究[9]にて作成した通常運転と縮退運転の遷移が可能な第三者監視システムを解析することにある。構築した第三者監視システムは 3 つの検知機能、制御用 PLC、縮退用 PLC から構成される。制御用 PLC はロボットアームをシーケンス制御し、攻撃を受けた後、縮退用 PLC がその制御を引き継ぐ。縮退運転に速やかに移行するには、各機能が正しく動作する事と、機能連携時に論理のデッドロックが発生しない事を保証する論理検証が必要となる。本稿ではこの論理検証のためのモデル化とシミュレーション解析について述べる。

本報告では縮退運転の具体例としてロボットアームの制御引き継ぎを考える。システムモデルの構築には、制御用、縮退用 PLC の I/O 情報のタイムチャートから有限時間オートマトンを求める事を考える。個々の PLC モデルの解析ではモデル検査ツール UPPAAL を用いる。この UPPAAL 上に制御用、縮

退用 PLC のモデルを搭載する。また第三者監視システムを統合的に管理するオブザーバモデルを作成し、縮退運転の動作検証を実施する。「サイバー攻撃による異常発生後の縮退用 PLC によるロボットアームの速やかな動作継続」という要求仕様を時相論理式的一种である TCTL で記述し、正常状態から異常発生を經由して縮退状態に到達可能かの可到達解析を行う。

1.1. 問題設定

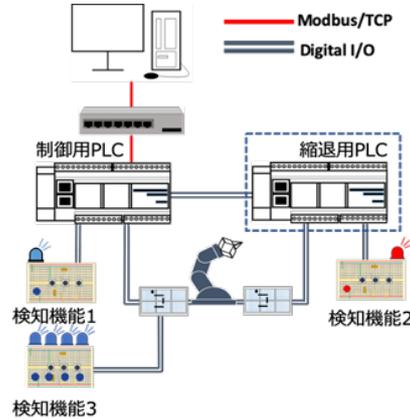


Fig. 1 実験用制御システム



Fig. 2 ロボットアーム動作

Fig. 1 は第三者監視装置を実現するための実験用制御システムを示している。エンジニアリング PC は制御用ネットワークを介して制御用 PLC のシーケンスプログラム書き込みや制御状態の監視を行う。制御用ネットワークのプロトコルは Modbus/TCP を採用している。制御用 PLC はイーサネットにてエンジニアリング PC に接続される。制御用 PLC が制御するロボットアームは Fig. 2 に示すように 8 つの動作を順に実行する。ロボットアームには各関節のモータの動きと連動して点灯する LED が接続されていて 8 つの動作を区別可能である。

実装する模擬サイバー攻撃はコントローラの機能を失わせる DoS 攻撃である。攻撃シナリオはマルウェアに感染したエンジニアリング PC が大量の packets を制御用 PLC に送信し、イーサネット内を packets で一時的に溢れさせ、制御用 PLC の可用性を侵害するものである。本研究における PLC の可用性の侵害とは、ロボットアームの動作の遅延や停止による継続的動作の侵害の事を示す。この模擬 DoS 攻撃を攻撃モデルとして通常の制御動作モデルに加え、通常制御中と縮退制御中に攻撃時間、攻撃回数の異なる 3 種類のシナリオを実施する。

本研究における縮退制御は制御用 PLC に異常が生じた時、制御系が異常を検知し、縮退用 PLC が制御を引き継ぐことである。この際、縮退用 PLC は通常の制御用ネットワークから孤立し、縮退制御中は外部機器からのロボットアームの制御プログラム切り替えや制御状態の観測が不可能である。利便性は下がるが、制御ネットワークを介した DoS 攻撃は縮退用 PLC に届かないので、ロボットアームの制御の可用性自体は守られることになる。

1.2. 第三者監視のための異常検知技術

縮退運転への移行には異常検知が必要となる。本章では異常検知法と LED を用いた異常の可視化を説明する。制御用 PLC 及び縮退用 PLC に書き込まれるプログラムはラダー言語により実装されている。

第三者監視システムの異常検知手法の詳細は先行研究[10]を参照されたい。制御用 PLC はロボットアームを制御する他に、自身と縮退用 PLC に対し、1 秒クロックを出力する。このクロックが通常制御系の縮退制御系へのアライブ通信となる。縮退用 PLC はその出力を監視し、2 秒間異常出力を検出した場合その状況を異常状態と検知する。ここで制御用 PLC に接続された LED を検知機能 1、異常検知用 PLC に接続された LED を検知機能 2、またロボットアームの各関節と連動する LED を検知機能 3 とする。以下に個々の検知機能の詳細を記す。

- 検知機能 1：制御用 PLC は縮退用 PLC に対し 1 秒クロックを出力する。この時、制御用 PLC に対しても同様な出力をする。LED は通常時、1 秒おきに点灯する。サイバー攻撃を受けた時は結果として制御用 PLC からの 1 秒クロックが途絶え、LED は点灯または消灯した状態になる。オペレータは LED の点灯状態を確認することにより LED が通常状態かどうかを判断できる。
- 検知機能 2：縮退用 PLC は制御用 PLC から 1 秒クロックを入力として受けとっている間は通常状態であるため、異常検知用 LED は点灯しない。異常が生じたとき、オペレータが認識しやすいようこの LED は点灯する。
- 検知機能 3：ロボットアームの各モータの動作と連動する LED によりオペレータはリアルタイムに異常の起きた箇所を特定できる。

1.3. モデル化手順

本章では制御用 PLC と縮退用 PLC の I/O 情報をモデル化することを考える。各検知機能のラダープログラムの詳細は先行研究[11]を参照されたい。本稿では、各 PLC の I/O 情報から導出されるタイムチャートを時間オートマトン化する方法を提案する。

モデル化する情報は各 PLC の I/O 情報である。異常発生時の制御用 PLC、及び縮退用 PLC I/O 動作のタイムチャートを Fig. 3 に示す。ここでは例として異常発生時刻を 11 秒とし、2 秒後に縮退制御に切り替わるとしている。攻撃により制御用 PLC の CPU がダウンし通常制系のクロック動作及びロボットアーム動作に遅延が生じる。先行研究にて構築した第三者監視システムは通常制御系と縮退制御系の基準とするクロックが異なる。これは異常発生後も制御用 PLC のクロックが使用できなくとも、縮退用 PLC 内部のクロックに従ってロボットアームの動作段階を推定することを目指しているからである。従ってシステム立ち上げに必要な制御用 PLC から縮退用 PLC に対する 1 スキャン分のクロック信号を除き、各 PLC が独立に動作するヘテロジニアスな構成となっている。

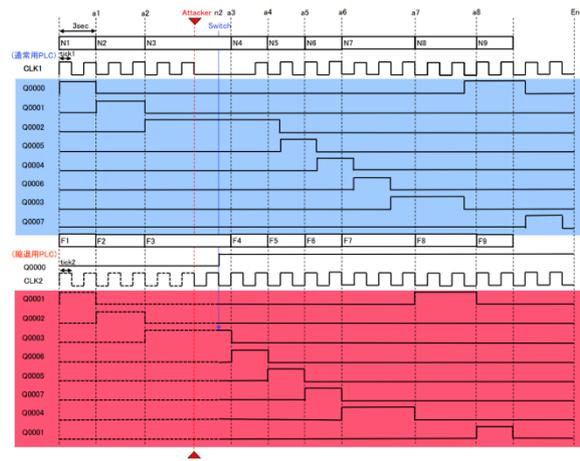


Fig. 3 各 PLC のタイムチャート

制御システムのモデル化には、時間オートマトンの記述を得意とするモデル検査ツール UPPAAL[12]を用いて Fig. 3 のタイムチャートを通常制御系、縮退制御系に分けてモデル化している。また先述した 3 種類の模擬 DoS 攻撃のモデルを構築し、これを通常制御系へ組み込むことで縮退運転の動作検証を行っている。UPPAL ではイベントの送信を!で、イベントの受信を?でそれぞれ表記する。モデル間でのイベントの相互通信は通常的时间オートマトンの枠組みではなく、また独自の拡張機能として値の受け渡し機能や特殊なロケーションが存在する。本章ではモデル間の値の受け渡しやイベントの相互通信にも着目することで実システムに近いモデル解析を行うことを検討する。

1.4. モデル検査

第三者監視システムがサイバー攻撃下でもシステムとして正しく動作していることを判断するために、システムモデルと並行して動作するオブザーバモデルを UPPAAL 上に別途実装する必要がある[13,14]。本章ではオブザーバモデルを構築し、縮退運転に必要な要求仕様を時相論理式の 1 種である TCTL で与えることによりシステムの可到達性を検証する。

本項で用いるオブザーバモデルは異常発生の有無に関係なく通常制御系モデル、縮退制御系モデルと並行して動作する。各制御系モデルからアクションを受け取ることで、正しく動作しているかが検証可能となる。また、本研究ではロボットアームが異常検知後も最終状態まで動作することを縮退運転時のタスクとしている。

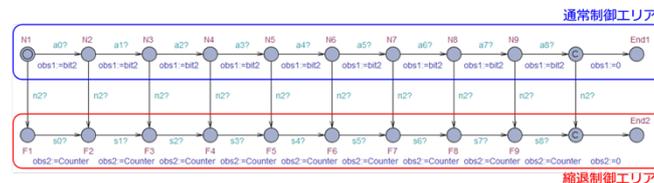


Fig. 4 オブザーバモデル

Fig. 4 に示すオブザーバオートマトンは通常制御エリアと縮退制御エリアに分かれる。通常制御エリアでは先述した制御用 PLC によるロボットアーム動作を表現している。この制御動作はモデル G_2 からのアクション $a_0? \sim a_8?$ を受け取るによりロケーション $N_1 \sim End_1$ まで順に遷移する。この遷移に伴いモデル G_2 の各ガード条件の値 bit2 を新たに obs_1 として上書きする。一方縮退制御エリアでは、縮退動作移行後

のロボットアーム動作を表している。本エリア内の制御動作はモデル G_6 からのアクション $s_0? \sim s_8?$ を受け取るによりロケーション $F_1 \sim End_2$ まで順に遷移する。各遷移に伴いモデル G_6 の各カウンタ値 Counter を新たに obs_2 として上書きする。また異常発生時における通常制御エリアから縮退制御エリアへの移行は縮退判定モデル G_3 のアクション $n_2?$ を受け取ることによって遷移する。

モデル検査ツール UPPAAL[12]ではシステムの仕様記述言語として TCTL のサブセットを検証性質の記述言語としている。UPPAAL での TCTL は 4 種類のパス限量記号 $A[], E[], A < >, E < >$ のみが記述可能である。ここでパス限量記号は、 A :全ての実行列で、 E :ある実行列で、である。また時間経過を記述する状態論理式は、 $[]P$:常に特性 P が成り立つ、 $< > P$:いつかは特性 P が成り立つ、で表現する。

本研究における縮退運転時の要求タスクは、「サイバー攻撃による異常発生後の縮退用 PLC によるロボットアームの速やかな動作継続」である。これは、Fig. 4 に示すオブザーバモデルにおける到達可能性を検証することと等価である。また、本項では通常制御時のタスクが終了するまでにかかる最小時間、最大時間および縮退制御時のタスク終了までにかかる最小時間、最大時間を比較することで縮退制御に切り替えた際の誤差時間を導出する。

通常制御時のタスク終了までにかかる最小・最大時間を導出するための最小性、最大性、可能性の検証式を以下に示す。タスク終了までにかかる最小時間は

$$A[] \quad (global\ clock < 37\ imply(not\ Ovserver.End_1)) \quad (A)$$

$$E < > \quad (global\ clock == 37\ and\ Ovserver.End_1) \quad (B)$$

の 2 式によって表現される。(A)式は最小性の検証式であり、「積算時間 37 秒未満ではタスクが終了することはない」ことを意味する。(B)式は可能性の検証式であり、「積算時間が 37 秒でタスクを終了することができる」ことを意味する。同様の方法で、「積算時間が 38 秒を超えてタスクが終了していないことはない」ことを意味する最大性の検証式(C)。(D)式は可能性の検証式であり、「積算時間が 38 秒でタスクが終了していないことがある」ことを意味する可能性の検証式(D)を設定する。これら(A)~(D)式により通常制御時間の最小値・最大値を導出することができる。また縮退制御時のタスクに関して、「積算時間が 39 秒を超えてタスクが終了していないことはない」ことを表す最小性の検証式(E)、「積算時間が 38 秒でタスクが終了していないことがある」ことを表す可能性の検証式(F)、「積算時間が 37 秒を超えてタスクが終了していないことはない」ことを表す最小性の検証式(G)、「積算時間が 38 秒でタスクが終了していないことがある」ことを表す可能性の検証式(H)を設定し、縮退制御時間の最小値・最大値を導出する。

1.5. 解析結果

TCTL で記したモデル検査式の検査結果を Table 1 に記す。尚、縮退制御時では先述した 3 種類の攻撃シナリオについて検証している。

Table 1 モデル検査結果

検査式	通常時	縮退時		
	モデル G_1	モデル A_1	モデル A_2	モデル A_3
(A)	○	—	—	—
(B)	○	—	—	—
(C)	○	—	—	—
(D)	×	—	—	—

(E)	—	×	×	×
(F)	—	○	○	○
(G)	—	×	×	×
(H)	—	○	○	○

Table 1 にあるように通常制御時ではオブザーバモデルにおける通常制御エリアの最終ロケーション End_1 まで到達可能であることがわかる。また到達時間を $task_1$ とすれば、

$$37 \leq task_1 < 38 \dots (1)$$

を満たす。一方縮退制御時でもオブザーバモデルの縮退制御エリアの最終ロケーション End_2 まで到達可能であることがわかる。また到達時間を $task_2$ とすれば、

$$38 \leq task_2 < 39 \dots (2)$$

を満たす。(1),(2)式より、通常制御時と縮退制御時の時間差は最大で 1 秒であることがわかる。また攻撃時間と攻撃回数に関係なく縮退制御に移行した場合、動作終了までの所要時間は(2)式に従う。これはシミュレーション解析からも明らかである。Fig. 5 に通常時における制御用 PLC と縮退用 PLC の動作を、Fig. 6~Fig. 11 に攻撃時におけるオブザーバモデルの動作結果を記す。シミュレーション解析では、時刻 16 秒に攻撃モデル $A_1 \sim A_3$ によって異常が生じる。この時 Fig. 7 では 4 秒間の DoS 攻撃、Fig. 9 では 10 秒間の DoS 攻撃、Fig. 11 では時刻 16 秒に 6 秒間の DoS 攻撃が起きた後、時刻 27 秒に 8 秒間の DoS 攻撃が生じているのが見て取れる。一方で、いずれの場合もオブザーバモデルの動作は変わらない。すなわち、攻撃が発生した時刻が同一の場合、縮退動作に攻撃時間や攻撃回数は関係しないことがわかる。また TCTL の検証結果からもわかる通り、縮退用 PLC との時間差が 1 秒以内であることから異常発生後の速やかな縮退動作移行が実現できている。このように通常制御系、縮退制御系と並行してシステムを統合的に管理するオブザーバモデルを UPPAAL 上に搭載することで、第三者監視システムの解析を行うことが可能となる。

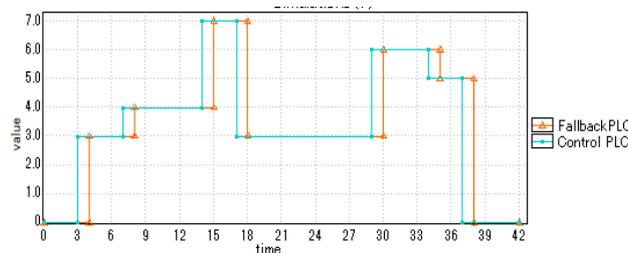


Fig. 5 通常時における各 PLC モデルの動作

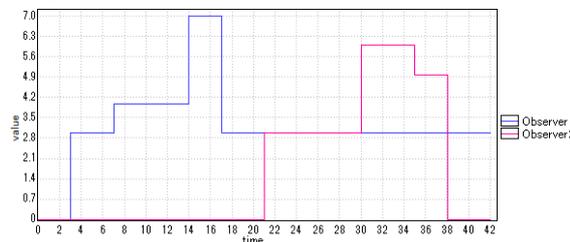


Fig. 6 攻撃モデル A_1 時のオブザーバ動作

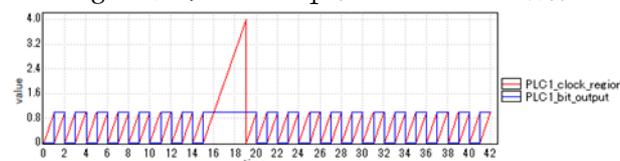


Fig. 7 攻撃モデル A_1 の動作結果

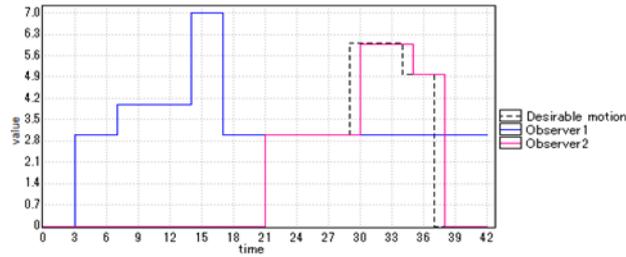


Fig. 8 攻撃モデル A_2 時のオブザーバ動作

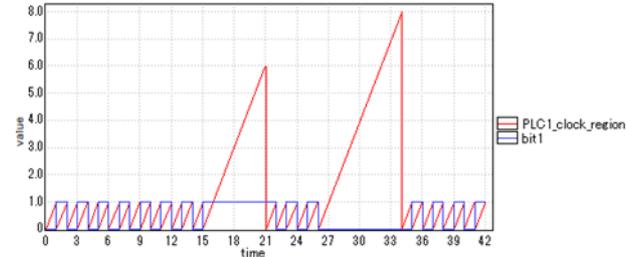


Fig. 9 攻撃モデル A_2 の動作結果

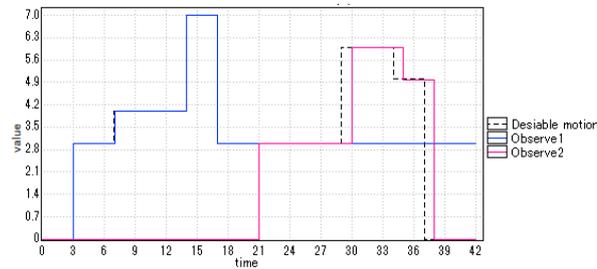


Fig. 10 攻撃モデル A_3 時のオブザーバ動作

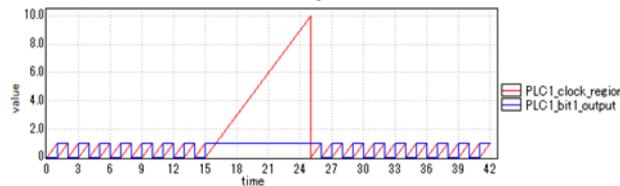


Fig. 11 攻撃モデル A_3 の動作結果

1.6. まとめ

本報告では通常運転と縮退運転の遷移が可能な第三者監視システムの解析を行った。縮退運転に速やかに移行するには、各 PLC モデルが正しく動作する事、機能連携時に論理のデッドロックが発生しない事を保証する論理検証が必要となった。そこで、個々の PLC のモデル化では制御用、縮退用 PLC の I/O 情報からタイムチャートを構築し、有限時間オートマトン化した。論理検証では通常制御系、縮退制御系の他にシステムを統合的に管理するオブザーバモデルを外部に設け、縮退運転時に必要な要求仕様を TCTL で与えることで可到達検証を行った。

参考文献

- [1] S. Zhioua: The Middle East under Malware Attack Dissecting Cyber Weapons, IEEE 33rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW), pp. 11-16, 2013.
- [2] G. Liang, S. R. Weller, and J. Zhao: The 2015 Ukraine blackout: Implications for false data injection attacks, IEEE Transactions on Power Systems, pp. 3317-3318, 2016.

- [3] T. Sasaki, K. Sawada, S. Shin, S. Hosokawa: Model Based Fallback Control for Networked Control System via Switched Lyapunov Function, IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE, pp. 2000-2005, 2015.
- [4] 祥慈, 大倉: 制御システムの動作モードに基づいたネットワーク振舞異常検知方式, 電気学会論文誌, C134(10), pp. 1492-1497, 2014.
- [5] K. Sawada, T. Sasaki, S. Shin, and S. Hosokawa: A Fallback Control Study of Networked Control Systems for Cybersecurity, The 10th Asian Control Conference 2015, pp.89-pp.94, 2015.
- [6] T. Sasaki, K. Sawada, S. Shin, and S. Hosokawa: Model Based Fallback Control for Networked Control System via Switched Lyapunov Function, Proc. 41st IECON2015, pp. 2000-2005, 2015.
- [7] 佐々木, 塚田, 澤田, 新, 細川: カルマン正準分解に基づくルールベース縮退運転システム, 第3回制御部門マルチシンポジウム(MSCS2016).
- [8] 澤田 賢治: 制御システムのためのモデルベースセキュリティ技術, 電気学会電子・情報・システム部門大会, pp. 401-402, 2016.
- [9] 阪田, 藤田, 澤田, 新, 前田: コントローラに対する第三者監視装置を用いた異常検知技術の提案, 電気学会電子・情報・システム部門大会, pp. 1536-1537, 2019.
- [10] 阪田, 藤田, 新, 前田, 細川: サイバー攻撃に対する可用性を考慮した第三者監視システム, システム・情報部門学術講演会 (SSI), pp. 1536-1537, 2019.
- [11] 阪田, 藤田, 澤田, 新: 時間オートマトンを用いた第三者監視システムのモデル化, Symposium on Cryptography and Information Security (SCIS), pp. 1-7, 2020.
- [12] <https://uppaal.org/>
- [13] H. B. Mokadem, B. Bérard, V. Gourcuff, O. D. Smet, and J. M. Roussel: Verification of a timed multitask system with UPPAAL, IEEE Transaction On Automation Science And Engineering, Vol. 7, No. 4, 2010.
- [14] S. M. Kesraoui, O. Goubali, D. Kesraoui, I. Eloumami, F. Oquendo: Formal Verification of the Race Condition Vulnerability in Ladder Programs, IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), pp. 892-897, 2020.

2. 3Dシミュレータによるセキュリティ検証

2.1. はじめに

サイバー攻撃事例の中には複数箇所を同時にもしくは段階的に攻撃するものが存在し, セキュリティ強度が情報システムほど高くないICSでは被害が拡大しやすい状況にある[1]. そのため, 複数の攻撃状態を判定し, 未然に防げない攻撃を受けた時には被害が拡大しないようにシステムを縮退運転に移行させる多階層型のICSセキュリティが必須である[2].

本研究の目的は複数攻撃に対する異常検知と異常発生箇所推定が可能な有限オートマトンモデルの設計である. 有限オートマトンモデルはプラントと制御用コントローラの振る舞いをネットワーク経由で観測する監視用端末上に実装される. 監視用端末はプラントの状態とオートマトンモデルの状態を比較し, 正常な制御状態からの逸脱を異常として判定する. 我々はこれまでに異常検知と異常発生箇所特定を目的とした有限オートマトンモデルの設計を行った[3].

先行研究[3]では複数箇所を対象とした攻撃に対し有限オートマトンモデルを用いてプラントの一連の動作を監視し, 現在時刻での操業データに加え過去一定期間内の操業データを用いることで異常検知と異常が発生した箇所の特定を行う. プラント内の並列に作動するセンサとアクチュエータに対する複数の攻撃検知のために, オートマトンモデル上でプラントの並列な状態を再現し, 並列な状態の監視と判

定を実施している。異常発生箇所の特定には、プラント内のセンサやアクチュエータの全てのログデータを監視する条件をオートマトンモデルで記述している。先行研究で設計したオートマトンモデルは異常検知に加え異常発生箇所の特定が可能な反面、リアルタイム異常検知が困難であった。本稿では、リアルタイム異常検知を重視し、プラント全体の監視ではなく作動したセンサ、アクチュエータを監視するオートマトンモデルを提案する。異常検知時刻での操業データのみを用いた異常発生箇所の推定と二分決定図（BDD: Binary Decision Diagram）[4]を用いオートマトンモデルにおけるロケーションと遷移に対し削除や共有を行いモデルのロケーション数を最適化をすることによって速やかな異常検知が可能となっている。

本報告ではプラントとして3DシミュレータであるFACTORY I/O⁸⁾上で作成した色仕分けプラントを利用する。監視用端末上の有限オートマトンモデルにはセンサ、アクチュエータの相互関係による遷移や状態による遷移が記述され、プラント全体を監視するモデルとなっている。異常発生時は異常値による遷移が発生した場所により異常発生箇所の推定を開始する。本研究では攻撃として複数箇所への同時攻撃を想定しており検証実験ではその状況下における異常検知、異常発生箇所推定を行う。

2.2. 問題設定

本研究ではプラントとして3Dシミュレータ上で模擬工場を作成できるFACTORY I/Oを使用する。

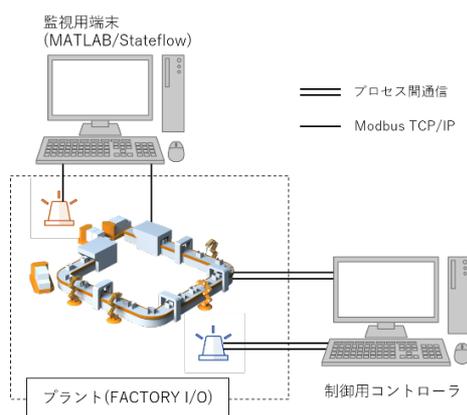


Fig. 12 実験環境

Fig. 12は複数異常検知を実現するための制御システムの実験環境を示しており、色仕分けプラント、制御用コントローラ、監視用端末により構成される。制御対象となる色仕分けプラントの各アクチュエータはプロセス間通信を介し制御用コントローラから制御指令を受ける。監視用端末上のMATLAB/Stateflow¹⁰⁾はプラントからネットワーク経由でデータを取得し、Matlab/Stateflow上の監視用モデルが自身の有限オートマトンモデルとしての制約に従って遷移を開始する。

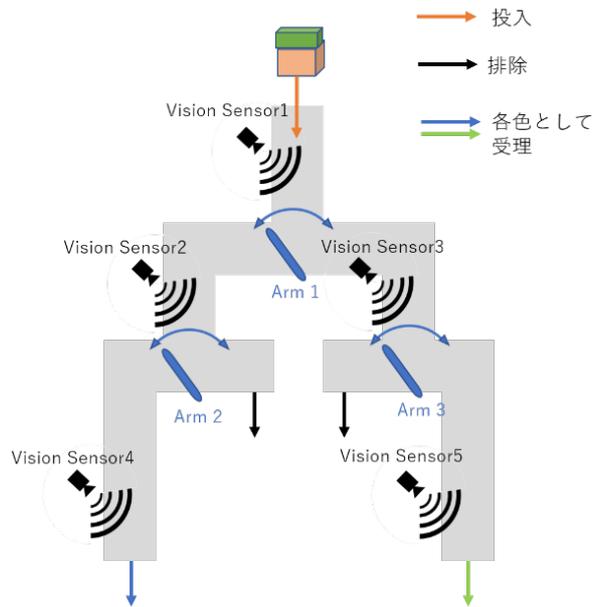


Fig. 13 色仕分けプラント（簡略図）

Fig. 13 は色仕分けプラントモデルの簡略図である。色仕分けプラントに流れてくる製品は土台ブロックの上にカラーブロックが載ったものであり、この1対が1つの製品となる。Vision Sensor1 は色（青、緑）を判定し、Vision Sensor1 による色判定に応じて制御用コントローラによる制御が Arm1 を作動させて各色のレーンへブロックを移動させる。レーンは左から青色、緑色レーンであり、カラーブロックを載せた製品に対し、Vision Sensor2 と Vision Sensor3 が基準の高さを検知した場合、制御用コントローラが Arm2 と Arm3 を作動させ、製品をレーン移動させる。Vision Sensor2 や Vision Sensor3 で基準の高さを検知できない場合、Arm2 や Arm3 は作動せず製品はそのままレーン上を流れ排除される。Vision Sensor4 と Vision Sensor5 は色判定の二重監視の役割として設置されている。上記の制御プログラムにおいて監視用端末上の監視モデルではアクチュエータの作動が制御プログラムに従ったものであるかを監視する。

本報告では産業用制御システムに対するサイバー攻撃としてマルウェア攻撃や不正アクセス攻撃に着目する。これらの攻撃はマルウェアもしくは悪意ある攻撃者がネットワーク経由でシステムに侵入し、システム停止等の被害をもたらすものである。本稿では、色仕分けプラントの制御用コントローラに外部からマルウェア侵入もしくは不正アクセスが発生し、各センサとアクチュエータに誤作動を起こす命令が実行された状態を想定する。その状態では、レーン上の製品に対してアクチュエータの誤作動が発生し、正常なレーン移動を行う事ができない。直接的にアクチュエータを誤作動させる攻撃と、センサ値を書き換えて間接的にアクチュエータを誤作動させることを考える。本報告ではこの2パターンの攻撃を Fig. 13 にある Vision Sensor, Arm に対して実行し、プラント状態の監視用モデルによって異常検知と攻撃が発生した箇所の推定が可能かを検証する。

2.3. 異常検知を目的としたオートマトンモデルと検証

MATLAB の Stateflow 上に異常検知機能と異常箇所特定機能を持ち合わせたオートマトンモデルの設計を行った。異常状態時には異常発生箇所に応じてセンサ異常かアクチュエータ異常かを推定する。またオートマトンモデルのうち有向非巡回グラフとなっているモデルに対しては、BDD により既約な形へ

と変換する。今回のプラントにはオートマトンモデルを 2 つ用いる。1 つ目のオートマトンモデルA1は制御プログラムによる各センサやアクチュエータの相互関係の監視による異常検知を行う。このオートマトンモデルは制御プログラムから抽出され、アクチュエータ作動が Vision Sensor に起因するものかどうかを判定し制御コントローラとプラントとの通信関係を監視する。2 つ目のオートマトンモデルA2は複数の攻撃が同時に発生した時に異常検知をする役割を持つ。モデルA1が巡回グラフとなっていることに対し、モデルA2は場合分け二分木の有向非巡回グラフとなっているため、モデルA2に対して BDD による冗長な遷移の削除や等価なロケーションの共有を行う。

FACTORY I/O 上の制御システムである色仕分けプラントに対して攻撃を実行し、監視用端末での動作検証を行った。今回は青色のカラーブロックを載せた製品が流れる時にセンサとアクチュエータである Arm1, Vision sensor2, Arm3 に対して時間差で異常な制御命令が加わり誤動作が発生する状況を想定し、検証結果を示す。実際の攻撃発生時に異常を検知した各センサとアクチュエータの応答を以下の Figs. 14-17 に示す。Fig. 14 はプラントに対する異常検知を示している。Figs. 14-17 において横軸は経過時間を示しており、Figs. 15-17 において上段縦軸はプラント内の各センサ、アクチュエータの状態、下段縦軸はオートマトンモデルでの異常検知結果を示す。異常検知結果において 1 は異常検知したことを示し通常状態では 0 である。

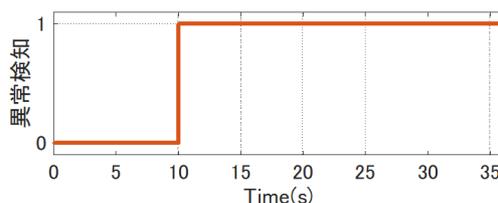


Fig. 14 プラント全体における異常検知

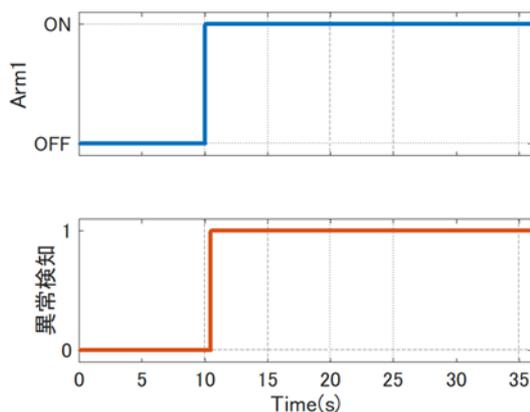


Fig. 15 Arm1 における異常検知

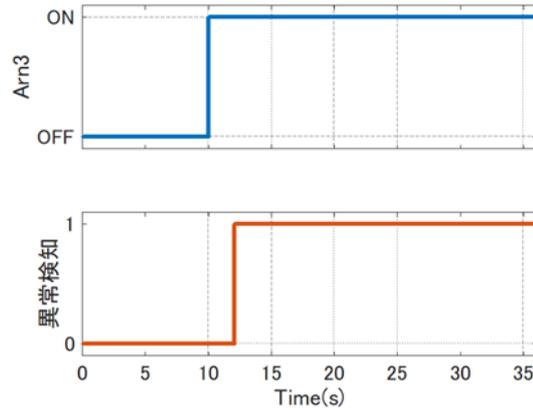


Fig. 16 Arm3 における異常検知

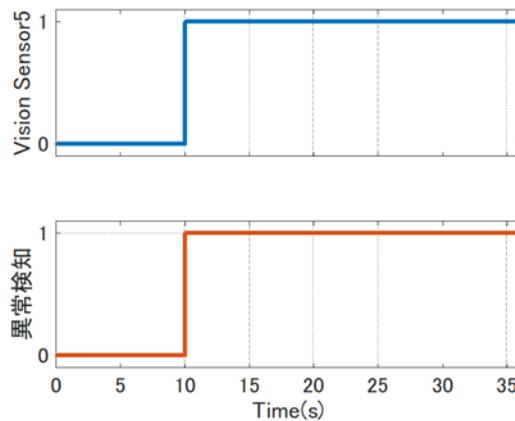


Fig. 17 Vision Sensor5 における異常検知

検証結果により異常発生時の異常検知と異常発生箇所での異常検知が可能であった。Arm1 と Arm3 での異常検知時刻の時間差は Fig. 5 のオートマトンモデルの構造が関係しており、Arm1 の次に Arm3 での異常検知をしていることが原因である。また、今回の攻撃では全 3 箇所での異常検知が可能であったが、検証実験による異常検知時刻で Arm1 が正常稼働を行っていた場合でも Arm1 は異常と判定される。原因としてはデータが不十分で異常発生箇所の特定制定ができなためであり、その場合 Arm1, Arm3, Vision Sensor5 の中に異常発生箇所があるとできるため、異常発生箇所の推定が可能である。

2.4. まとめ

制御系システムに対する異常検知機能と複数の異常箇所推定機能を有する有限オートマトンモデルを設計し、シミュレーション上で検証を行った。検証実験によりリアルタイムの異常検知と異常発生時点での制御データによる異常発生箇所の推定ができることを確認した。今回はリアルタイム異常検知を重視し異常発生箇所の特定制定まではできないものの異常発生箇所推定が可能であった。現段階としては攻撃発生時の異常検知と異常箇所の推定による最適縮退運転選択のための準備段階まではできている。今後の課題として異常箇所特定後に最適な縮退運転を選択し、オートマトンモデルにより縮退運転用の制御コントローラへの制御切り替えが可能なモデルの設計を目指す。

参考文献

- [1] D. E. Whitehead, K. Owens, D. Gammel, J. Smith : "Ukraine cyber-induced power outage: Analysis and practical mitigation strategies", 2017 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE), 4/3-6 (2017)
- [2] 関根弘昭, 大久保隆夫 : 多層防御下におけるシステムのセキュリティ対策の有効性評価手法の提案, Computer Security Symposium 2017
- [3] 池田佳輝, 阪田恒晟, 藤田真太郎, 澤田賢治 : 複数攻撃を想定した有限オートマトンモデルによる異常検知と特定, Symposium on Cryptography and Information Security (SCIS), pp.1-5, 2021.
- [4] 石浦菜岐佐 : An Introduction to Binary Decision Diagrams, the Information Processing Society of Japan, 5/15(1993)
- [5] FACTORY I/O, <https://factoryio.com/>
- [6] Chu Chen, Pinghong Ren, Baoxiang Cao, Jiguo Yu : " A pretreatment algorithm for minimizing deterministic finite automata based on state transition symmetry", 2010 International Conference on Networking and Digital Society, 409/411 (2010)
- [7] MATLAB, <https://jp.mathworks.com/products/matlab.html>

業績一覧

学術論文

- [1] Shintaro Fujita, Kosuke Hata, Akinori Mochizuki, Kenji Sawada, Seiichi Shin, Shu Hosokawa: OpenPLC based control system testbed for PLC whitelisting system, Journal Artificial Life and Robotics, Vol.26, No.1, 149/154 (2021.1) (2020年8月12日採択)
- [2] 佐倉衛, 澤田賢治, 新誠一, 金子修, 松田功 : モデルベース開発の為にエネルギー検証自動化とモデリングガイドライン, 電気学会論文誌 C, Vol.140, No.9, 1064/1073 (2020.9) (2020年5月11日採択)
- [3] 福永秀樹, 澤田賢治, 濱田吉郎, 新誠一 : Generic Transport Model を用いた航空機の上下加速度に対する最悪外乱の一解析 , システム制御情報学会論文集, Vol.33, No.8, 250/252 (2020.8) (2020年4月10日採択)
- [4] 市原 裕之, 山本 将史 , 澤田賢治 : 拡大系に対する周期的事象駆動制御系の設計, 計測自動制御学会論文集, Vol.56, No.4, 236/242 (2020.4) (2020年01月20日採択)
- [5] Takuma Wakasa, Yoshiki Nagatani, Kenji Sawada and Seiichi Shin: Switched pinning control for merging and splitting maneuvers of vehicle platoons, The IEICE Transactions on Fundamentals, Vol.E103-A, No.4, 657/667 (2020.4)(2019年12月18日採択)(2020年4月 The IEICE Transactions on Fundamentals のダウンロード数1位)

国際会議

- [1] Yukari Mochizuki, Kenji Sawada: An analysis of expansion and reduction speeds of traffic jams on graph exploration, AROB 26th 2021, 319/324, 21-23. Jan. 2021. (Virtual conference, Oral, Abstract Review)
- [2] Kousei Sakata, Shintaro Fujita, Kenji Sawada: Synthesis of Resilient Third-Party Monitoring System Against Cyberattacks via Supervisory Control, IEEE ICCE 2021, 18-21, Jan. 2021(Virtual conference,

Oral, Full Paper Review)

- [3] Takuma Wakasa, Kenji Sawada: Distributed Cooperative Partial-State Observer for Position Estimation of Vehicle Platoon, IECON2020, 186/191, 2020 (Virtual conference, 2020.10.28-31) (Full paper review)
- [4] Haruka Matsushita, Kaito Sato, Mamoru Sakura, Kenji Sawada, Seiichi Shin, Masaki Inoue: Rear-wheel steering control reflecting driver personality via Human-In-The-Loop System, 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 356/362, 2020 (Virtual conference, 2020.10.11-14) (Full paper review)
- [5] Junya Fujita, Takashi Ogura, Noritaka Matsumoto, Osamu Kaneko, Kenji Sawada: Investigation of Cyber Attack Emulation Methodology for Industrial Control Systems, SICE Annual Conference, 31/34, 2020 (Virtual conference, 2020.9.23-9.26-12.01) (Position paper review)
- [6] Noritaka Matsumoto, Junya Fujita, Hiromichi Endo, Tsutomu Yamada, Kenji Sawada, Osamu Kaneko: Method of Asset-Configuration Management for Strengthening Cybersecurity of Industrial Control Systems, SICE Annual Conference, 35/38, 2020 (Virtual conference, 2020.9.23-9.26-12.01) (Position paper review)
- [7] Kaito Sato, Kenji Sawada, Masaki Inoue, On the Instant Iterative Learning MPC for Nonlinear Systems, SICE Annual Conference, 1166/1171, 2020 (Virtual conference, 2020.9.23-9.26-12.01) (Full paper review)
- [8] Takuma Wakasa, Kenji Sawada, Path Planning and Tracking Method for Multiple Platoons via Switched Pinning Control, SICE Annual Conference, 1159/1162, 2020 (Virtual conference, 2020.9.23-9.26-12.01) (Position paper review)
- [9] Masatoshi Enomoto, Kenji Sawada, Shu Hosokawa: A consideration of white list creating algorithm for industrial network protocols at network switch, SICE Annual Conference, 45/50, 2020 (Virtual conference, 2020.9.23-9.26-12.01) (Full paper review)
- [10] Takuma Wakasa, Kenji Sawada, Seiichi Shin: Event-Triggered Switched Pinning Control for Merging or Splitting vehicle Platoons, 21st IFAC World Congress, Paper ID:3004, 2020 (Virtual conference, 2020.7.13~8.31) (Full paper review)
- [11] Hiroyuki Ichihara, Kenji Sawada, Koichi Kobayashi, Sophie Tarbouriech: Periodic Event-Triggered Control for Extended Plants of Linear Systems - A Convex Approach, 21st IFAC World Congress, Paper ID:1021, 2020 (Virtual conference, 2020.7.13~8.31) (Full paper review)

学会口頭発表

- [1] 松本典剛, 藤田淳也, 遠藤浩通, 山田勉, 澤田賢治, 金子修: 産業制御システムのセキュリティを強化する資産管理手法, MSCS2021, 1H1-3 (2021.3.1-4) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [2] 藤田淳也, 小倉貴志, 松本典剛, 澤田賢治, 金子修: 産業制御システム向けサイバー攻撃エミュレーション技術の調査, MSCS2021, 1H1-4 (2021.3.1-4) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [3] 藤田真太郎, 澤田賢治, 細川嵩: シーケンス制御のホワイトリスト式異常検知のための並列動作のモデル化, MSCS2021, 1C1-2 (2021.3.1-4) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [4] 佐藤海斗, 澤田賢治, 井上正樹: 連続時間最適化アルゴリズムによる線形モデル予測制御と受動性に

- 基づく収束性解析, MSCS2021, 2D1-1 (2021.3.1-4) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [5] 若狭拓馬, 澤田賢治: 車群速度制御のためのスパースピニング制御, MSCS2021, 2D2-4 (2021.3.1-4) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [6] 阪田恒晟, 藤田真太郎, 澤田賢治: 制御システムに対する縮退運転ロジックの設計, MSCS2021, 1C2-3 (2021.3.1-4) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [7] 池田佳輝, 阪田恒晟, 藤田真太郎, 澤田賢治: 有限オートマトンモデルに基づく複数攻撃に対する異常検知と異常箇所推定, MSCS2021, 1C2-1 (2021.3.1-4) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [8] 柴原将太郎, 若狭拓馬, 澤田賢治: 複数列縦隊移動するロボット群の障害物回避のためのネットワーク重み関数, MSCS2021, PS1-11 (2021.3.1-4) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [9] 堀内柚那, 山藤勝彦, 澤田賢治: ドライバの予見動作を支援する MPC 型自動運転システムに関する研究, MSCS2021, PS1-10 (2021.3.1-4) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [10] 長谷川亮太, 澤田賢治: ガウス過程回帰の信頼区間を利用した制御システムの時系列異常検知, SCIS2021, 3E3-1 (2021.1.19-22) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [11] 阪田恒晟, 藤田真太郎, 澤田賢治: 制御システムに対する縮退運転のためのモデル化とシミュレーション解析, SCIS2021, 3E3-2 (2021.1.19-22) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [12] 池田佳輝, 阪田恒晟, 藤田真太郎, 澤田賢治: 複数攻撃を想定した有限オートマトンモデルによる異常検知と特定, SCIS2021, 3E3-3 (2021.1.19-22) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [13] 藤田真太郎, 澤田賢治, 細川嵩: コントローラホワイトリスト生成のための制御プログラム構造, SCIS2021, 3E3-5 (2021.1.19-22) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [14] 澤田賢治: 小型マイクログリッドにおける協調給電プロトコルと正当性検証のためのモデル化, 第 63 回自動制御連合講演会, 2H4-3 (2020.11.21-22) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [15] 若狭拓馬, 澤田賢治: 分散協調部分状態オブザーバを用いた車群位置推定における補間関数のスパーモデリング手法, 第 63 回自動制御連合講演会, 2F3-1 (2020.11.21-22) 新型コロナウイルスによりオンライン開催 (優秀発表賞)
- [16] 佐藤海斗, 澤田賢治, 井上正樹: 連続時間最適化アルゴリズムによる非線形モデル予測制御の提案, 第 63 回自動制御連合講演会, 2F1-3 (2020.11.21-22) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [17] 阪田恒晟, 藤田真太郎, 澤田賢治, 新誠一: サイバー攻撃に対するレジリエントな第三者監視システムのモデル化, 第 63 回自動制御連合講演会, 1F1-5, (2020.11.21-22) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [18] 藤田真太郎, 澤田賢治, 新誠一, 細川嵩: 制御システムに対する協調型ホワイトリストの検討, SSI2020, 171-175 (2020.11.15-17) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [19] 若狭拓馬, 武藤僚佑, 澤田賢治: プラトゥーン走行における分散協調オブザーバを用いた位置推定, 第 64 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'20), 624-631 (2020.5.20-22) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [20] 佐藤海斗, 澤田賢治, 井上正樹: 非線形システムに対する instant iterative learning MPC の提案, 第 64 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'20), 681-685 (2020.5.20-22) 新型コロナウイルスによりオンライン開催
- [21] 阪田恒晟, 藤田真太郎, 澤田賢治, 新誠一: サイバー攻撃に対するレジリエントな第三者監視システムの構築, 第 64 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'20), 440-446 (2020.5.20-22) 新型コロナ

コロナウィルスによりオンライン開催

招待講演

- [1] FA用3Dシミュレータによるセキュリティ検証用ベンチマークモデル開発の提案～制御システムのホワイトリスト～, FAOP技術セミナー2021, 2021/03/18
- [2] 【ガイオ・テクノロジーのWEBセミナー】制御システムのセキュリティを強化するホワイトリスト, Gサイバーチャンネル, 2021.2.15
- [3] 【ガイオ・テクノロジーのWEBセミナー】モデルベース開発のためのエネルギー検証に基づくバグ検知, Gサイバーチャンネル, 2021.1.27
- [4] 制御システムセキュリティ:動くモノを守る技術, 電気通信大学新技術紹介フェア 2020 秋, 2020/11/25
- [5] 制御システムのための多階層型セキュリティ機能の開発, 先端制御セミナー, 第63回自動制御連合講演会, 2020/11/21

著書

- [1] 工場・製造プロセスへのIoT・AI導入と活用の仕方, 情報技術協会, 2020年6月30日, 12章第2節「モデルベース開発と制御システムセキュリティ」の執筆担当

解説記事

- [1] 藤田真太郎, 澤田賢治, コントローラホワイトリストの自動化と検証, 計測と制御, Vol. 60, No. 1, 21/26, 2021
- [2] 澤田賢治, コントローラに対するホワイトリスト式サイバー攻撃検知, 化学工業, Vol. 72, No. 1, 62/71, 2021

2.主要研究成果

2.7 COVID-19 の感染拡大防止における換気とエネルギー消費に関する取組

横川 慎二教授

情報理工学域 I 類/総合情報学科/情報学専攻 経営・社会情報学プログラム 兼務

1.1. COVID-19 の感染拡大防止における換気とエネルギー消費に関する取組

1.1.1. 目的

iPERC では、超スマート社会における先進的なオフィスの具体化の一つとしての、フリーアドレスオフィス環境をとりあげ、そこでのエネルギー消費予測や消費の最適化制御、分散型エネルギーシステムの適用性検証、学習者やワーカーの生産性に対する影響などの実践的研究を行ってきた。2020年2月頃より、COVID-19 の感染拡大が社会に大きな影響を及ぼすようになってきたことに伴い、CO₂ センシングとデータ解析による換気性能向上などの取り組みを行ってきた。

2020年度は、本学の「研究の連携・統合化等による本学の機能強化に係る取組」において「空間のセンシングとリスクの可視化・言語化による感染拡大抑制に向けた環境・行動制御の研究」として採択され、情報学専攻の石垣陽准教授と共同で、センサーの開発とそれを活用した教室、卒業式、入学式の空気質測定や評価を行った。

1.1.2. 現在までの取り組み

エネルギー消費予測や消費の最適化制御、分散型エネルギーシステムの適用性検証、学習者やワーカーの生産性に対する影響などの実践的研究を行う研究基盤を本学の附属図書館に整備された学修スペースに設置し、2019年度より測定とデータ解析を開始している。



この場所は、2017年4月に本学の附属図書館と人工知能先端研究センターが設置した新学修スペース「Ambient Intelligence Agora (以下, Agora)」であり、約1,000m²の広さをもつ実験的学修スペースである。利用者が無線プレゼンテーション機器、プロジェクタ、モニタなどを使ったプレゼンテーションの練習や、ガラス製ホワイトボードを用いてディスカッションをすることが可能となっている。それらの空間に、人感・温湿度・CO₂センサーやネットワークカメラなどが設置され、個人情報保護を十分に配慮したうえで、利用者の学修の様子をデータ化し、ビッグデータ、人工知能、ロボット、適応学修などの研究への活用を目指すものである。

Agoraのスペースは図1のレイアウトに示されるように、グループ学習や個人学習、ミーティング、セミナーなどを行うのに最適化された区画に分かれており、それぞれの空間でのアクティビティをモニタリングすることが可能となっている。本研究センターでは、この空間のコンセントに約250個のスマートコンセントと30台のゲートウェイを整備した。これらのコンセントは、利用者がノートPCやタブレットPCなどを使用してプログラミングやレポート作成などを行うのに使用されている。一部のコーナーでは、プロジェクタやモニタを用いたグループワークにも使用されており、通常オフィスレベルで行われる活動に近い使われ方が想定される。これらを近年 HEMS の無線通信プロトコルとして注目されている Z-wave でネットワーク化し、環境情報と組み合わせて電力消費をモニタリングする無線センサーネットワークとして構築した。このネットワークにより、Agoraの電力消費の長期間運用状況のデータを得るとともに、多数の無線通信によるセンシングや環境制御に関する課題の抽出を行っている。図1のセンシングデータは、Agoraで得られたデータを学術情報課と共同で作成した可視化ボードであり、現在 Agora 内に設置されたディスプレイに表示されている。

さらにフォーマットの異なる各種のセンシングデータを、時間軸を揃えて可視化するとともに、各種の機械学習、深層学習、統計解析などのプラットフォームに移行させるデータ管理環境を構築した。異なるタイムスタンプで取得されたセンサーデータが、自動的に同一の時間軸上にフォーマット整形処理され



図2. 敷設した Z-wave スマートタップ (左)とゲートウェイ設置状況(右).

るので、各種センサーデータ間の相関を分析、検討することが可能となる。この整然化されたデータを用いて位相的データ解析などの手法を用いた研究を実施し、査読付き論文、国際会議などを通じて報告し

ている。

1.1.3. 学内における CO₂センシング

COVID-19 の感染拡大防止のため、本学でも可能な科目に関してはリモート講義を行う、教室の定員の半以下で人数で講義を行うなどの対策を行っている。その効果の検証や、改善のために、感染拡大のリスクの可視化の取り組みを、2020 年度に行った。

COVID-19 の感染には、接触、飛沫、エアロゾルなどの経路が寄与しているとされている。前者の 2 つについては、手指の消毒、マスクの確実な着用などによって感染拡大防止がとられている。エアロゾル感染については、感染拡大の一つの経路であるか否かは大きな議論であったが、一つの感染経路として確実という結果が示されてきている。一方で、その対策としては感染者の入退室管理と換気である。消毒やマスクなどの対策に比較して、換気が適切になされているか否か、すなわち場の空気質が適切に管理されているか否かについては、対策の実施状況や効果を目で見て確認できないため、何らかの方法でこれを可視化することが重要である。また、空調によるエネルギー消費とのトレードオフを考慮した換気が必要となる。

そこで、本学の「研究の連携・統合化等による本学の機能強化に係る取組」において「空間のセンシングとリスクの可視化・言語化による感染拡大抑制に向けた環境・行動制御の研究」の一環として、以下の学内 7 か所に CO₂ センサーを設置し、授業や昼休みを含む終日の CO₂ 濃度の推移を常時監視している。

- ① A棟 201
- ② A棟 302
- ③ B棟ロビー
- ④ C棟 201
- ⑤ 新C棟 203
- ⑥ 生協 (2F 食堂)
- ⑦ 生協 (1F 購買)

設置の例を図 3 に示す。授業や試験の支障とならないよう、LCD などの発光や、アラーム音などの発音の機能を除いたセンサーを開発した。このセンサーは 3G/LTE ドングルを内蔵し、電源の供給のみで測定と通信を行い、直接データをクラウドサーバーに格納する仕様とした。クラウドに格納したデータは、前述の学内のデータ管理環境に API 連携によって取り込み、整然化して格納している。

得られたデータの時系列推移の例を図 4 に示す。2021 年 3 月 8 日から 10 日の 3 日間に行われた集中講義が行われた A201 教室の CO₂ 濃度の推移を示すものである。少人数での講義（履修者 9 名、教員 1 名の合計 10 名）による授業であったものの、終日の講義によって 1500 ppm 近くまで CO₂ 濃度が増加し



図3. 学内設置例 (A302 教室).

ていることがわかる。また、授業後の無人状態において CO₂ 濃度が低下することがみとれる。ところが、1 日目、2 日目の CO₂ 濃度の低下は窓閉め切り状態の自然換気によるものと思われ、12 時間以上経過した時点でも外気レベルまで低下せず、前日の CO₂ 濃度上昇の影響が残っていることがわかる。3 日目の講義終了後、筆者らが窓開け換気（前後入り口、教室 4 隅の窓を開）を行ったところ、短時間で換気が完了した。すなわち、旧型の換気装置しか備わっていない古い建屋の教室においては、換気装置による機械換気に加えて、常時窓開けによる換気を併用する必要がある。

現在これらの結果を受け、各教室に「最低限入口 2 箇所と窓 4 箇所を開ける」とのガイドラインが示されている。また、前日の排気を実際に行うため、換気装置は原則停止しない旨の注意喚起がスイッチ部に示されている。

窓開けを行った際の CO₂ 濃度変化は、外気状況の影響を受けるため複雑となるが、図4 の状況におけ

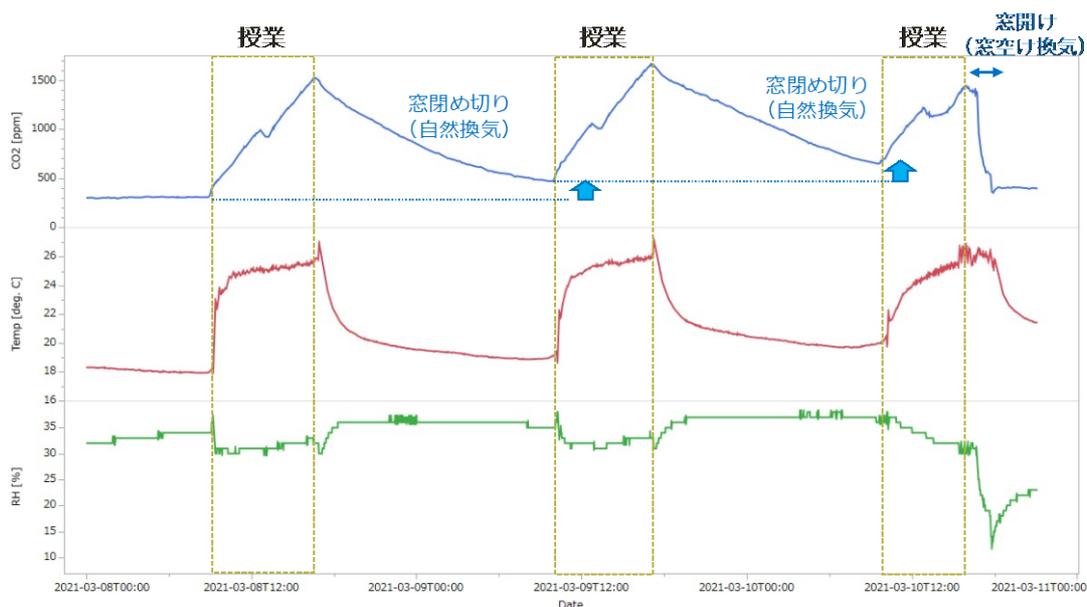


図4. 集中講義時のセンシング結果の推移 (A201).

る濃度変化は、時間方向の予測精度を上げるために図5のような微分方程式表現で説明することが可能と考えられる。

• 微分方程式表現: $m \leq n$

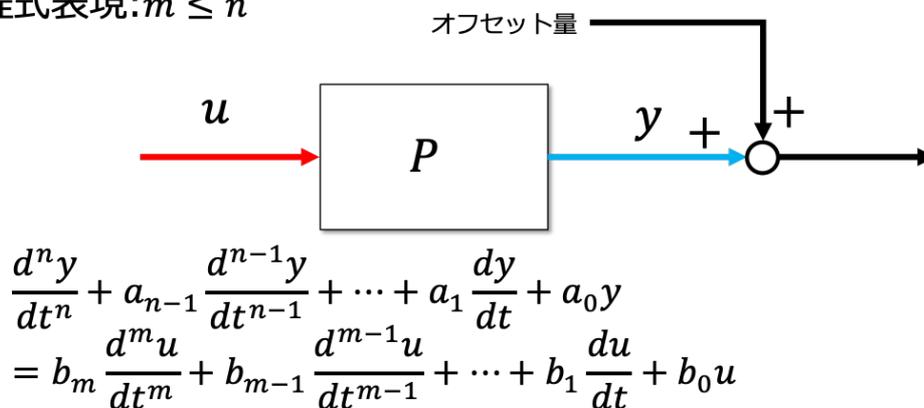


図5. 観測された CO2 濃度変化の微分方程式表現.

空間形状や空気対流までを考慮すると、常微分方程式でのモデル化に限界はあると考えられる。一方で、固定点計測の場合にはある程度の効力を有すると考えられる。また、今回の観測結果に関するモデル化は、「絶対量変化」ではなく「相対量変化」に着目している。すなわち、基準状態からの変化量のモデル化なので、基準状態が大きく変わればモデルも再構築する必要がある。

それらの前提のもとで、制御工学のシステム同定手法(最小二乗法, 予測誤差法, 部分空間同定法など)を利用してモデル構築を試みたところ、4次以上のモデルでは実データとの一致率(Fit率)はほとんどかわらない結果が得られた(図6)。また、制御工学的に人間の感覚で把握できる2次モデルでは、CO₂減少度合いを表現できていない。一方で、「換気がされない教室のCO₂変化量は常微分方程式で表現できる」ことがわかった。言い換えれば、微分方程式の重ね合わせの原理に従って基本モデルの応答を重ね合わせれば、人数増加時の予測も可能となると考えられる。本稿では、応答の滑らかさの観点で8次モデルを採用して、以降の検討を行う。

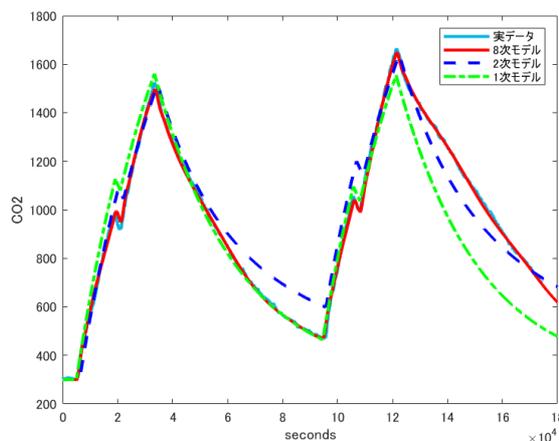


図6. 実データと構築したモデルの当てはまりの比較.

初期 CO₂量を 300ppm とし、教室内人数が 10 名とした場合、実験データでは授業開始約 27600 秒後、

約 460 分後、約 7.7 時間後に CO₂ 濃度が 1500ppm を超えている。構築した予測モデルにおいて、昼休みなしで授業実施した時を想定すると、授業開始約 26160 秒後、約 436 分後、約 7.3 時間後、4 限目の最終部分で 1500ppm を越えることになり、ほぼ一致する結果が得られる。そこで、教室内の人数が異なった際の CO₂ 濃度が 1500ppm を超える時間を求めた結果は以下のようになる。

初期 CO₂ 量：300ppm

教室人数：10 名 授業開始約 436 分後

教室人数：20 名 授業開始約 202 分後

教室人数：30 名 授業開始約 124 分後

教室人数：40 名 授業開始約 87 分後

すなわち、A201 教室において 40 人程度で授業を行った際に、窓開けを行わない状態では一コマ分の時間で換気を要するレベルである 1500ppm を超えることが予想される。なお、1500ppm は CO₂ 貯蓄量の定常状態ではなく過渡状態であるため、人数が 4 倍になって時間が 1/4 倍になるわけではないことに注意する必要がある。

2021 年度にはセンシングを継続すると同時に、電力消費との関連を考慮して、適切な換気方法を検討する必要がある。

1.1.4. 卒業式、入学式における換気状態のモニタリングと可視化

これまでの Agora での観測の結果などから、室内の CO₂ 濃度は人数・人流・局所換気能力によって局所隔たりが生じることがわかっている。そこで 2020 年度には、卒業式と入学式の会場に 10 個のセンサーを配置し、局所換気量の評価とリアルタイム可視化を行った。令和 2 年度卒業式、および令和 3 年度入学式にて、ホール内の CO₂ 濃度をメッシュ状に配置したセンサー測定した。また、ドライアイスを用いた換気量測定実験を行い、より参加人数の多い入学式の換気能力向上について検討した。

図 7 に令和 2 年度卒業式の CO₂ 濃度の推移を示す。午前中の学域卒業式、午後の大学院卒業式、夕方の成績優秀者表彰式の時間に合わせて、CO₂ 濃度が上昇していることがわかる。特に、最も低い位置にあたる 1F の濃度が比較的高くなる傾向となることがわかった。

そこで、実際の換気量を推定するための実験を実施した。図 8 のように換気を停止した状態でドライアイスを粉砕してホール内の CO₂ 濃度を上昇させ、その後換気を行って CO₂ 濃度が低下する様子を観測して、換気状況を調査した。その結果に基づき、サーキュレータによる換気や、建物の扉開放を追加して換気の改善を行った。それらの結果を反映して実施した令和 3 年度入学式では、図 9 に示されるように、卒業式の倍以上の参加人数にも関わらず CO₂ 濃度は 1000ppm 以下の良好なレベルに保持され、1F 部で CO₂ 濃度が高くなる傾向もみられなくなっている。

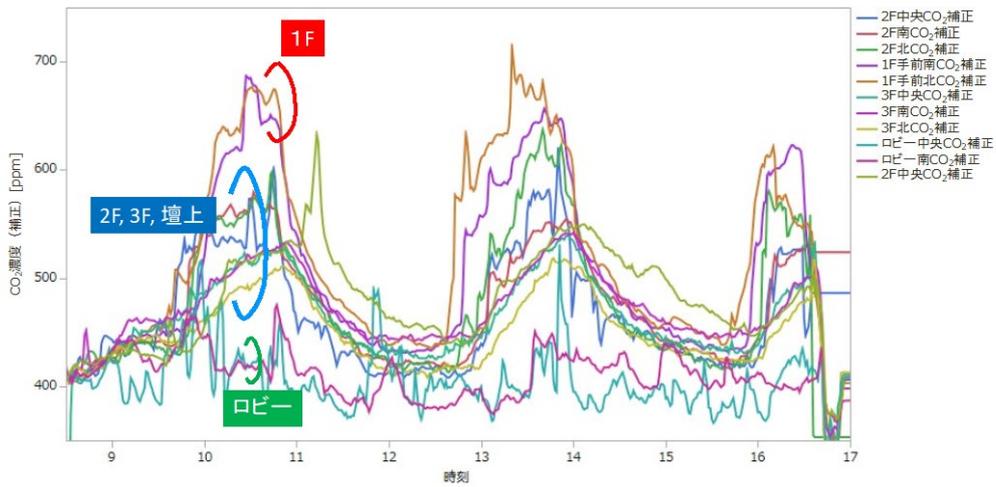


図7. 令和2年度の卒業式におけるCO₂濃度の推移.



図8. ドライアイスを用いた換気量推定実験の様子.

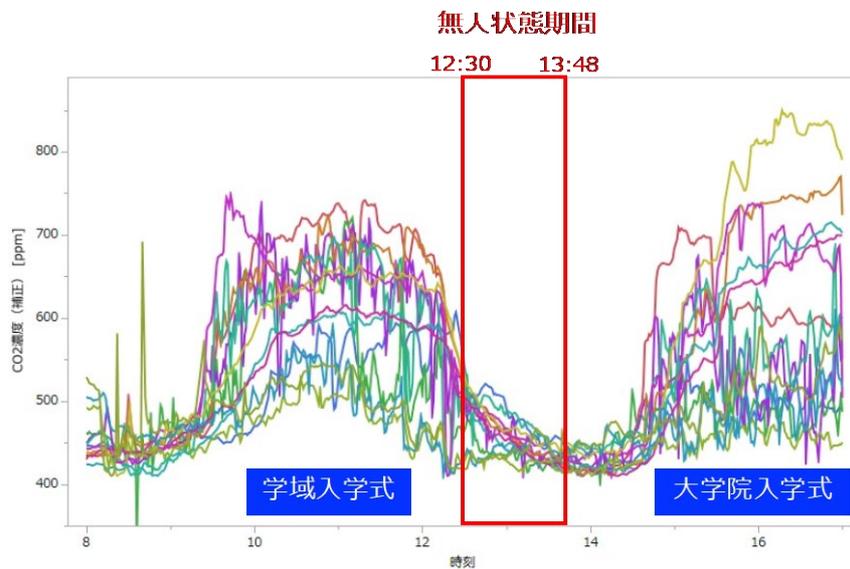


図9. 令和3年度入学式におけるCO₂濃度の推移.

換気量測定実験を行った際のCO₂濃度の時間変化と、入学式の際の（ほぼ）無人状態におけるCO₂濃度の時間変化より求めた換気回数推定値の比較結果を図10に示す。改善策によって、換気回数が有意に改善されていることがわかる。

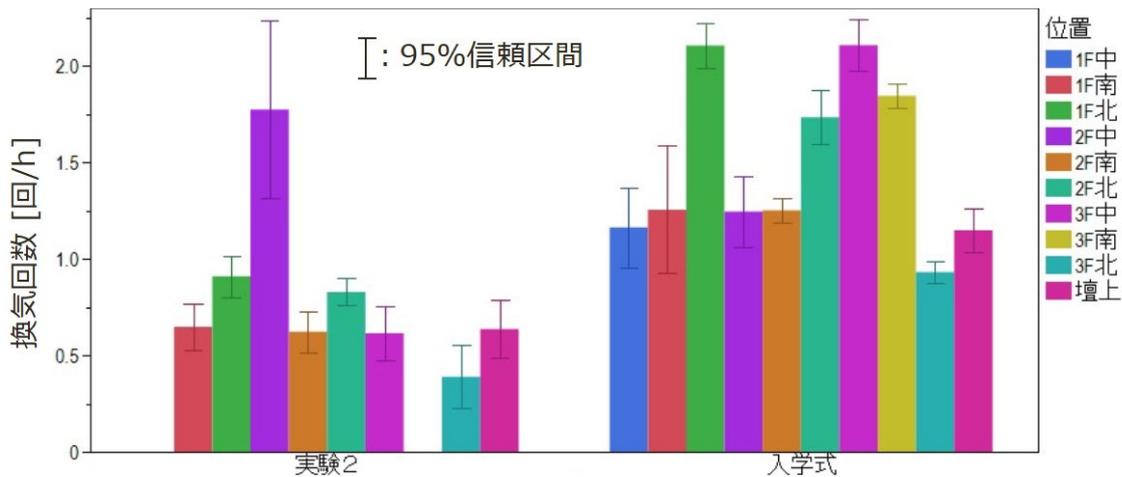


図 10. 換気回数の推定値の比較.

これらの活動によって得られたノウハウを活用して、現在調布駅前広場に設置された COVID-19 ワクチン接種会場の CO₂ 濃度モニタを、調布市と連携して行っている。仮設で構築されたプレハブ会場は、電気容量が必要最低限で設計されており、コンセントの数も非常に少ない状態にある。そこで、バッテリー給電を行って対処している。本件のみでなく、将来の IoT センシングの課題として、小規模だが数の多い電力供給をどのように行ってゆくかという点が、今後顕在化していくものと思われる。その課題抽出を行うことが、本取組の目的の一つである。

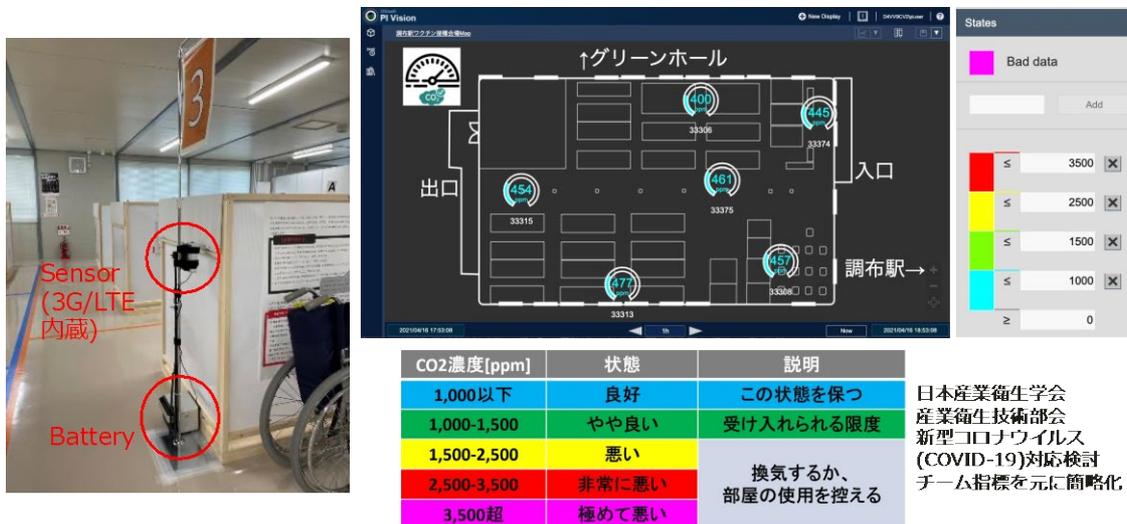


図 11. 調布駅前 COVID-19 ワクチン接種会場における CO₂ 濃度モニタ.

全てのものがセンサーで計測され、得られたデータが連携して分析され、制御、運用されてゆく Society 5.0 においては、このセンシングを如何に安定的に、かつ自由度高く運用していくかが重要となる。特にその場面は平常時だけではなく、災害などで系統からの供給が失われた場合も考慮しなければならない。iPERC では、Society 5.0 を支える基盤技術の一つとして、大量の IoT センサーにどのように電源を供給してゆくかという課題を研究テーマの一つとして取り組んでゆく。

3. 活動一覧

3.1. 外部発表

iPERC 教員が関連する 2020 年度の外部発表（論文、国際会議、学会口頭発表、著書、解説、招待講演等）の件数は下記の通りである。発表一覧は 4 節に掲載。

論文	国際会議	学会口頭発表	著書	解説記事	招待講演
70	26	93	5	3	25

3.2. 知的財産

iPERC コアメンバー（大川、横川、曾我部、澤田、市川、早瀬）が関連する知的財産権、特許の件数は下記の通りである。

特許出願件数 1 件

- ・後川，武田，市川，横川，中里：“発電量推定装置”，特願 2021-037410，2021/3/9

特許登録件数 2 件

- ・三次，五十嵐，市川，川喜田，江川：無線通信システム，特許第 6726131(2020/6/30)
- ・三次，宮澤，市川，川喜田，江川：測角装置，特許第 6718342(2020/6/16)

3.3. 産学官連携実績

iPERC コアメンバー教員（大川、横川、曾我部、澤田、市川、早瀬）が関連する産学官連携研究(新規および継続分)の件数は下記の通りである。研究テーマの一覧は 3.5.に掲載。

2020 年度分のみ

	共同研究	受託研究	学術相談	寄附金	合計
実施件数	15 件	10 件	3 件	2 件	30 件

3.4. 競争的資金

iPERC コアメンバー教員（大川、横川、曾我部、澤田、市川、早瀬）が関連する競争的資金の件数と金額は下記の通りである。科研費と 3.3 の産学連携実績、学内競争的資金の合計の件数は 38 件である。研究テーマの一覧は 3.5 に掲載。

2020 年度分のみ

	科研費研究	産学官連携	学内競争的資金	合計
実施件数	7 件	30 件	1 件	38 件

3.5 主な共同研究・受託研究・科研テーマ一覧

《創エネルギー》

- 「機械学習における基礎研究」曾我部東馬
- 「エネルギー・環境分野における数理モデルと人工知能の融合」曾我部東馬
- 「太陽光発電主力電源化推進技術開発/ 太陽光発電の新市場創造技術開発/ 壁面設置太陽光システム技術開発（ビル壁面開口部向けシースルー太陽電池の開発）」曾我部東馬
- 「搬送システムの制御に関する技術相談」曾我部東馬
- 「単層型非鉛ペロブスカイト太陽電池技術に関する共同研究」早瀬修二
- 「ペロブスカイト/ シリコンタンデム太陽電池向けペロブスカイト太陽電池の研究」早瀬修二
- 「花王が開発した次世代太陽電池の解析」早瀬修二
- 「管状太陽電池の生産技術の開発」早瀬修二
- 「JST Pb フリーペロブスカイト太陽電池の効率化と高耐久性化」早瀬修二
- 「JST ペロブスカイト充填細孔構造生成と構造のモデル化」早瀬修二
- 「Pb 含量が少ない環境にやさしい Sn 系混合金属ペロブスカイトの研究開発（2019 年度二国間交流事業韓国との共同研究《NRF》）」早瀬修二
- 「太陽光発電主力電源化推進技術開発/ 太陽光発電の新市場創造技術開発/ フィルム型超軽量モジュール太陽電池の開発（重量制約のある屋根向け）（超軽量ペロブスカイト計太陽電池の研究開発）/ ボトムセル用ナローギャップペロブスカイト材料」早瀬修二
- 「新エネルギー等のシーズ発掘・事業化に向けた技術研究開発事業/新エネルギー等のシーズ発掘・事業化に向けた技術研究開発事業（太陽光）/農地発電用途に適した円筒型太陽電池システムの技術開発」早瀬修二
- 「次世代太陽光発電向け円筒型太陽電池システムの研究開発」早瀬修二
- 「大面積化を可能にする鉛フリー高効率立体ペロブスカイト太陽電池製造技術の開発」早瀬修二
- 「無鉛型高次元ハライドペロブスカイト材料による太陽電池の高効率・高耐久化」早瀬修二
- 「鉛を含まない Sn-ペロブスカイト太陽電池の高効率化指針提案」早瀬修二

《蓄エネルギー》

「石巻市エネルギー構造高度化・転換理解促進事業費における最適な電源システムの構築・提案」
横川慎二

「ワイブル解析での分布パラメータ推定」横川慎二

「酸化膜の寿命試験用テストストラクチャと解析手法の研究開発」横川慎二

「半導体信頼性技術に関する件」横川慎二

《活エネルギー》

「協調給電による再生可能エネルギー指向自律分散グリッドの開発と実証」

曾我部東馬、澤田賢治、横川慎二、市川晴久、早瀬修二、大川富雄

「沿面発電による電気エネルギーの地産地消効果のマイクロ分析と課題抽出」市川晴久

「エネルギー・環境分野における数理モデルと人工知能の融合」曾我部東馬

「BPSD 予測・予防により介護負担を軽減する認知症対応型/ AI・IoT サービスの開発と実装」
横川慎二, J 専攻 内海彰との共同研究

「空間のセンシングとリスクの可視化・言語化による感染拡大抑制に向けた環境・行動制御の研究」
曾我部東馬, 横川慎二, 澤田賢治, 人工知能センター (AIX), 先進アルゴリズム研究ステーション, 次世代品質信頼性情報システム融合研究ステーション, 研究設備センター先端研究設備部門との共同研究

《制御系セキュリティ》

「セキュリティ検証基盤の構築に係る研究」澤田賢治

「複合シミュレーションにおけるエネルギー保存性検証手法の検討」澤田賢治

「協調型制御状態切り替え方式における安全遷移論理生成方法の立案」澤田賢治

「水道施設における制御装置の信頼性向上に関する調査研究」澤田賢治

「協調多層型防御技術のための事象駆動型制御理論の構築」澤田賢治

「有限時間可到達集合に基づく不連続システムの解析と設計に関する研究」澤田賢治

「スパースセンシングの制御系設計への展開」澤田賢治

3.6 主な教育

i-PERC 関連のシンポジウム・セミナー等は以下の通りである。

2021.3.4 UEC Agora ミニシンポジウム

「AI・ビッグデータ×図書館 ～デジタル革新による共創の場の再生～」

主催：附属図書館 Ambient Intelligence Agora 運営委員会

共催：人工知能先端研究センター、i-パワードエネルギー・システム研究センター、
大学教育センター

「学修空間における環境センシングデータの活用」横川慎二教授

ポストコロナのニューノーマルにおいては、従来の形式であった集合型の教室・教育や、集合型のオフィスは、変わってゆくと考えられる。言い換えれば、自由度の高い、フリーアドレス空間での学びや、コラボレーションワークによる成長と価値創出が一層重要になると思われる。安全・安心な空間環境と自由度の高いエネルギーの供給を通じて、集いのリスクを低減することが、今後の課題となる。本講演では、Society 5.0 を実現するための IoT 環境センシングの実践として、本学附属図書館 Agora にて実施している環境センシングデータとコンセント単位の局所電力消費に関する分析の結果から、空間環境の安全・安心の確保に関する取り組みについて紹介した。

3.7 表彰

1. Shohei Kidera, "B06: Inverse Scattering and Imaging" and "KB1: Electromagnetic Biomedical Imaging and Inversion", 2020 URSI General Assembly (URSI GASS August, 2020).
2. 小木曾公尚, "リニアステージの高速・高精度位置決め制御システムに関する研究"において、NEOMAX エンジニアリング株式会社 感謝状を受賞。(2020/2/15).

4. 外部発表一覧(2020.4~2021.3)

4.1. 【一般論文】

1. 遠藤駿, 横川慎二; "位相的データ解析を用いた室内環境に関する時系列多次元データの分析," 電子情報通信学会・システムソサイエティ和文論文誌, Vol.J104-D, No.4, pp. 318-327 (2021).
2. 武山真弓, 佐藤勝, 安井崇, 横川慎二; "エゾシカ肉のおいしさのリアルタイム計測", 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ和文論文誌, Vol. J103-C, No. 9, pp. 387-394 (2020), 招待論文.
3. **Shinji Yokogawa**; "Applications of lifetime distribution functions with two shape parameters for reliability analysis in advanced interconnect technologies: a brief review," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 59, pp. SL0802-1-13 (2020).
4. Tomoki Murota, Toshiki Mimura, Ploybussara Gomasang, **Shinji Yokogawa** and Kazuyoshi Ueno; "Humidity reliability of commercial flash memories for long-term storage," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 59, SLLC01-1-SLLC01-4 (2020), brief note.
5. **T. Sogabe**, C-Y. Hung, R. Tamaki, S. Tomić, K. Yamaguchi, N. Ekins-Daukes and Y. Okada; "Experimental demonstration of energy-transfer ratchet intermediate-band solar cell" Communications Physics (2021.3.1).
6. C-C. Chen, K. Shiba, M. Sogabe, K. Sakamoto and **T. Sogabe**; "Hybrid quantum-classical dynamic programming algorithm", Springer Nature series Advances in Intelligent Systems and Computing: Selected Papers from the Annual Conference of Japanese Society of Artificial Intelligence (JSAI2020 in press).
7. R. Sogabe, D. Bahadur Malla, M. Sogabe, K. Sakamoto and **T. Sogabe**; "Impact of Domain Knowledge's Quality on Inverse Reinforcement Learning", Springer Nature series Advances in Intelligent Systems and Computing: Selected Papers from the Annual Conference of Japanese Society of Artificial Intelligence (JSAI 2020) (in press).
8. **T. Sogabe**, C.-Y. Hung, R. Tamaki, S. Tomic, N. Ekins-Daukes and Y. Okada: "Fabrication of Erbium Doped GaAs Intermediate-Band Solar Cell", Proceedings of the European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 13-19, 3-936338-73-6(2020).
9. Abduheber Mirzehmet, Tomoki Ohtsuka, Syed A. Abd. Rahman, Takumi Aihara, Muhammad Akmal Kamarudin, Shahrir Razey Sahamir, **Shuzi Hayase**, Tomoki Yuyama, Peter Kruger, Hiroyuki Yoshida, Surface structure of quasi-2D perovskite PEA₂mMAN-mPbnI₃n (n>>m), 2021 Appl. Phys. Express 14 031006.
10. 早瀬修二、 硫酸と工業、イオン元素を利用したペロブスカイト太陽電池の安定性と性能向上、2020, 73, 88-94.
11. Hirofumi, Daisuke; Nishimura, Kohei; Hamada, Kengo; Kamarudin, Muhammad; Iikubo, Satoshi; **Shen, Qing**; Toyoda, Taro; **Hayase, Shuzi**, Relationship between perovskite solar cell efficiency and lattice disordering, Jpn. J. Appl. Phys. 2021, 60 035001.
12. Fan Zhang, Qingxun Huang, Jun Song, **Shuzi Hayase**, Junle Qu, **Qing Shen**, A New Strategy for Increasing the Efficiency of Inverted Perovskite Solar Cells to More than 21%: High - Humidity

- Induced Self - Passivation of Perovskite Films, *Solar RRL*, 2020, 4, 2000149. 2020.
13. Yaohong Zhang, Guohua Wu, Chao Ding, Feng Liu, Dong Liu, Taizo Masuda, Kenji Yoshino, **Shuzi Hayase**, Ruixiang Wang & **Qing Shen**. Surface-Modified Graphene Oxide/Lead Sulfide Hybrid Film-Forming Ink for High-Efficiency Bulk Nano-Heterojunction Colloidal Quantum Dot Solar Cells. *Nano-Micro Lett.* 2020, 12, 111. <https://doi.org/10.1007/s40820-020-00448-8>.
 14. Ding, C.; Liu, F.; Zhang, Y.; Hirotsu, D.; Rin, X.; **Hayase, S.**; Minemoto, T.; Masuda, T.; Wang, R.; **Shen, Q.** Photoexcited hot and cold electron and hole dynamics at FAPbI₃ perovskite quantum dots/metal oxide heterojunctions used for stable perovskite quantum dot solar cells, *Nano Energy*, 2020, 67, 104267.
 15. Hirotsu, D., Maeda, Y., Kamarudin, M. A., **Shen, Q.**, Toyoda, T., & **Hayase, S.** The effect of p/n junction position on perovskite solar cell efficiency by changing polarity of perovskite layer. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2020, 59 061005.
 16. Feng Liu, Junke Jiang, Yaohong Zhang, Chao Ding, Taro Toyoda, **Shuzi Hayase**, Ruixiang Wang, Shuxia Tao, **Qing Shen**, Near-Infrared Emission from Tin–Lead (Sn–Pb) Alloyed Perovskite Quantum Dots by Sodium Doping, *Angewandte Chemie*, 2020, 132, 8499-8502.
 17. Shuhei Ozu, Yaohong Zhang, Hironobu Yasuda, Yukiko Kitabatake, Taro Toyoda, Masayuki Hirata, Kenji Yoshino, Kenji Katayama, **Shuzi Hayase**, Ruixiang Wang and **Qing Shen**, Improving Photovoltaic Performance of ZnO Nanowires Based Colloidal Quantum Dot Solar Cells via SnO₂ Passivation Strategy, *Front. Energy Res.*, 20 February 2019 <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00011>.
 18. Md. Zaman Molla, Ajay K. Baranwal, **Shuzi Hayase**, Shyam S. Pandey, "Effect of electrolyte for back contact transparent conducting oxide-less dye-sensitized solar cells: iodine versus cobalt," *J. Photon. Energy*, 2020, 10(4), 045501.
 19. Seojun Lee, Janghyuk Moon, Jun Ryu, Bhaskar Parida, Saemon Yoon, Dong-Gun Lee, Jung Sang Cho, **Shuzi Hayase**, Dong-Won Kang, Inorganic narrow bandgap CsPb_{0.4}Sn_{0.6}I_{2.4}Br_{0.6} perovskite solar cells with exceptional efficiency. *Nano Energy*, 2020, 77, 105309.
 20. Chao Ding, Feng Liu, Yaohong Zhang, **Shuzi Hayase**, Taizo Masuda, Ruixiang Wang, Yong Zhou, Yingfang Yao, Zhigang Zou, and **Qing Shen**, Passivation Strategy of Reducing Both Electron and Hole Trap States for Achieving High-Efficiency PbS Quantum-Dot Solar Cells with Power Conversion Efficiency over 12%, *ACS Energy Lett.* 2020, 5, 3224 – 3236.
 21. Mengmeng Chen. Shahrir R. Sahamira, Gaurav Kapil, Ajay K. Baranwal Muhammad Akmal Kamarudin, Yaohong Zhang, Kohei Nishimura, Chao Ding Dong Liu, Daisuke Hirotsu, **Qing Shen**, **Shuzi Hayase**, Inverted CsPbI₂Br perovskite solar cells with enhanced efficiency and stability in ambient atmosphere via formamidinium incorporation, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 218, 2020, 110741.
 22. Feng Liu, Junke Jiang, Yaohong Zhang, Chao Ding, Taro Toyoda, **Shuzi Hayase**, Ruixiang Wang, Shuxia Tao, and **Qing Shen**, Reviving Near-Infrared Emission for Sn-Pb Alloyed Perovskite Quantum Dots by Sodium Doping, *Angew. Chem.*, 131, 1-5, 2020, <https://doi.org/10.1002/ange.201916020>. (IF:11.69).
 23. Feng Liu, Yaohong Zhang, Chao Ding, Kentaro Kawabata, Yasuha Yoshihara, Taro Toyoda, **Shuzi**

- Hayase**, Takashi Minemoto, Ruixiang Wang, **Qing Shen**. Trioctylphosphine Oxide Acts as Alkalest for SnX₂/PbX₂: A General Synthetic Route to Perovskite AS_nxPb_{1-x}X₃ (A= Cs, FA, MA; X= Cl, Br, I) Quantum Dots. *Chem. Mater.* 2020. 32. 3. 1089-1100.
24. Molla, Md. Zaman; Baranwal, Ajay; **Hayase, Shuzi**; Pandey, Shyam, Boosting the efficiency of Lowcost T-C-O-less Dye-Sensitized Solar Cells employing nanoparticle spacer and Cobalt complex redox shuttle, *ACS Appl. Electron Mater.*, 2020, 2, 9, 2721-2729.
25. Md. Zaman Molla, Ajay Kumar Baranwal, Gaurav Kapil, **Shuzi Hayase**, Shyam S. Pandey, of Back-Contact T-C-O-free Dye-Sensitized Solar Cells employing Indoline and Porphyrin sensitizer based on Cobalt Redox Electrolyte, *Solar Energy*, 2020, 208:411-418.
26. Jena, Ajay; Ishii, Ayumi; Guo, Zhanglin; Kamarudin, Muhammad Akmal; **Hayase, Shuzi**; Miyasaka, Tsutomu, *Journal: ACS Applied Materials & Interfaces*, "Cesium Acetate-Induced Interfacial Compositional Change and Graded Band Level in MAPbI₃ Perovskite Solar Cells", *ACS. Appl. Mate. Interfaces*, 2020, 12, 30, 33631-33637.
27. Kyung-Su Nam, Suvratha Krishnamurthy, **Shen Qing**, Taro Toyoda, Kenji Yoshino, Takashi Minemoto, Tingli Ma, Shyam Pandey, and **Shuzi Hayase**, Stability improvement of perovskite solar cells by adding Sb-xanthate to precursor solution, *Physica Status Solidi (a), Applications and Materials Science*, 2020, 217, 2000144.
28. Yaohong Zhang, Guohua Wu, Chao Ding, Feng Liu, Dong Liu, Taizo Masuda, Kenji Yoshino, **Shuzi Hayase**, Ruixiang Wang, **Qing Shen**, Surface-Modified Graphene Oxide/Lead Sulfide Hybrid Film-Forming Ink for High-Efficiency Bulk Nano-Heterojunction Colloidal Quantum Dot Solar Cells, *Nano-Micro Lett.* 2020, 12, 111.
29. Guo, Zhanglin; Jena, Ajay; Takei, Izuru; Kim, Gyu Min; Kamarudin, Muhammad Akmal; Sanehira, Yoshitaka; Ishii, Ayumi; Numata, Youhei; **Hayase, Shuzi**; Miyasaka, Tsutomu, "Voc over 1.4 V for amorphous tin oxide-based dopant-free CsPbI₂Br perovskite solar cells" *JACS*, 2020, 142, 21, 9725-9734.
30. Bhaskar Parida, Saemon Yoon, Jun Ryu, **Shuzi Hayase**, Sang Mun Jeong, and Dong-Won Kang, Boosting the Conversion Efficiency Over 20% in MAPbI₃ Perovskite Planar Solar Cells by Employing a Solution-Processed Aluminum³ Doped Nickel Oxide Hole Collector *ACS Materials and Interfaces*, (2020) 12, 20, 22958–22970.
31. Kohei Nishimura, Muhammad Akmal Kamarudin, Daisuke Hirotsu, Kengo Hamada, **Qing Shen**, Satoshi Iikubo, Takashi Minemoto, Kenji Yoshino, **Shuzi Hayase**, Lead-free Tin-halide Perovskite Solar Cells with 13% Efficiency" *Nano Energy*, 2020, 74, 104858.
32. Hamada, Kengo; Tanaka, Ryo; Kamarudin, Muhammad Akmal; **Shen, Qing**; Iikubo, Satoshi; Minemoto, Takashi; Yoshino, Kenji; Toyoda, Taro; Ma, Tingli; Kang, Dong-won; **Hayase, Shuzi**, Enhanced device performance with passivation of the TiO₂ surface using a carboxylic acid fullerene monolayer for a SnPb perovskite solar cell with a normal planar structure, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2020, 12, 15, 17776-17782.
33. Tsuguo Koyanagi, Gaurav Kapil, Yuhei Ogomi, Kenji Yoshino, **Qin Shen**, Taro Toyoda, Takuro N. Murakami, Hiroshi Segawa, **Shuzi Hayase**, Hot-injection and ultrasonic irradiation syntheses of

- Cs₂SnI₆ quantum dot using Sn long-chain amino-complex, *J Nanopart Res*, 2020, 22:69.
34. Ajendra Kumar Vats, Anusha Pradhan, **Shuzi Hayase**, Shyam S. Pandey, Synthesis, photophysical characterization and dye adsorption behavior in unsymmetrical squaraine dyes with varying anchoring groups, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2020, 394, 112467. (IF:3.26).
 35. Chi Huey Ng, Kengo Hamada, Gaurav Kapil, Muhammad Akmal Kamarudin, Zhen Wang, Satoshi Iikubo, **Qing Shen**, Kenji Yoshino, Takashi Minemoto and **Shuzi Hayase**, Reducing traps density and carriers concentration by Ge additive for an efficient quasi 2D/3D perovskite solar cell, *J. Mater. Chem. A*, 2020, 8, 2962-2968.
 36. Indarta Kuncoro Aji, Tatsuya Tatsuya, Motoyasu Kinoshita, **Tomio Okawa**, "An experimental and numerical study of wall effect on freeze valve performance in a molten salt reactor", *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, 6/ 2, 21105 (2020).
 37. . 市川先生
 38. Shintaro Fujita, Kosuke Hata, Akinori Mochizuki, **Kenji Sawada**, Seiichi Shin, Shu Hosokawa: OpenPLC based control system testbed for PLC whitelisting system, *Journal Artificial Life and Robotics*, Vol.26, No.1, 149/154 (2021.1).
 39. 佐倉衛, 澤田賢治, 新誠一, 金子修, 松田功: モデルベース開発の為にエネルギー検証自動化とモデリングガイドライン, *電気学会論文誌 C*, Vol.140, No.9, 1064/1073 (2020.9).
 40. 福永秀樹, 澤田賢治, 濱田吉郎, 新誠一: Generic Transport Model を用いた航空機の上下加速度に対する最悪外乱の一解析, *システム制御情報学会論文集*, Vol.33, No.8, 250/252 (2020.8).
 41. 市原 裕之, 山本 将史, 澤田賢治: 拡大系に対する周期的事象駆動制御系の設計, *計測自動制御学会論文集*, Vol.56, No.4, 236/242 (2020.4) .
 42. Takuma Wakasa, Yoshiki Nagatani, **Kenji Sawada** and Seiichi Shin: Switched pinning control for merging and splitting maneuvers of vehicle platoons, *The IEICE Transactions on Fundamentals*, Vol.E103-A, No.4, 657/667 (2020.4).
 43. Dr. Manh Luong, **Koichiro Ishibashi**; "A Concurrent Triple-band RF Energy Harvesting Circuit for IoT Sensor Networks" *IEIE Transactions on Smart Processing and Computing*, (2020).
 44. Guanghao Sun, Nguyen Vu Trung, Le Thi Hoi, Pham Thanh Hiep, **Koichiro Ishibashi** & Takemi Matsui; "Visualisation of epidemiological map using an Internet of Things infectious disease surveillance platform" *Critical Care*, (2020).
 45. Thuy-Linh Nguyen, Shiho Takahashi, Van-Trung Nguyen, Yasuo Sato, **Koichiro Ishibashi**; "RF Energy Harvesting using Cross-couple Rectifier and DTMOs on SOTB with Phase Effect of Paired RF Inputs" *ECTI Transactions on Electrical Engineering*, (2020).
 46. Luong Duy Manh, Phan Thi Bich, Nguyen Thuy Linh, Nguyen Huy Hoang, Xuan Nam Tran and **Koichiro Ishibashi** Luong Duy Manh; "A Concurrent Triple-band RF Energy Harvesting Circuit for IoT Sensor Networks" *IEEE Transactions on Smart Processing and Computing*, (2020).
 47. Guanghao Sun, Nguyen Vu Trung, Le Thi Hoi, Pham Thanh Hiep, **Koichiro Ishibashi** & Takemi Matsui; "Visualization of epidemiological map using an Internet of Things infectious disease surveillance platform" *Critical Care*, (2020).

48. T. Toujyou, T. Konishi, M. Hirayama, **K. Yamaguchi** and S. Tsukamoto; "Intermittent Growth for InAs Quantum Dot on GaAs(001)" J. Cryst. Growth, 551, 125891 1-125891 5, (2020).
49. 池崎太一, **金子修**; "プレフィルタを用いた Virtual Internal Model Tuning による制御性能の向上", 計測自動制御学会論文集, 57/ 3, (2021).
50. 川口 将貴, **金子 修**; "非最小位相系に対する ERIT", 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌) , 141/ 3, 301-306, (2021).
51. 井堀 礼晶, **金子 修**, 宅島 勉; "精密加工用ならい制御装置における外乱除去を目的としたテーブル型ゲインのデータ駆動型更新", 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌) , 141/ 3, 307-314, (2021).
52. 山岡 洋斗, 桑原 圭佑, 東 隆弘, **金子 修**; "ホーニングマシンにおける加工物のテーパ低減を目的とした FRIT によるデータ駆動学習制御", 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌) , 141/ 3, 339-344, (2021).
53. 樋口 奎, 池崎 太一, **金子 修**; "スミス補償器に対する Virtual Internal Model Tuning", 計測自動制御学会論文集, 56/ 8, 412-420, (2020).
54. 定本知徳, 小林史弥, **金子 修**; "フィードフォワード制御器の性能保証付きデータ駆動設計法の提案", システム制御情報学会論文集, 33/ 6, 201-206, (2020).
55. 桑原 圭佑, 池崎 太一, 定本 知徳, **金子 修**; "目標応答追従のためのデータ駆動制御型参照信号整形", 計測自動制御学会論文集, 56/ 5, 269-274, (2020).
56. 大塚 勝登, **金子 修**, 成田 浩昭; "FRIT を用いた空調用制御弁の開度制御", 電気学会論文誌 C, 140/ 5, 508-514, (2020).
57. Yaohong Zhang, Shuhei Ozu, Guohua Wu, Chao Ding, Feng Liu, Dong Liu, Takashi Minemoto, Taizo Masuda, Shuzi Hayase, Taro Toyoda, and **Qing Shen**; "In-Depth Exploration of the Charge Dynamics in Surface-Passivated ZnO Nanowires", 誌名確認, 124/ 29, 15812-15817, (2020).
58. T. Masuda, Y. Zhang, C. Ding, F. Liu, K. Sasaki, **Q. Shen**, M. Endo; "All-inorganic cesium lead halide perovskite nanocrystals for solar-pumped laser application", Journal of Applied Physics, 127/ 243104, 1-9, (2020).
59. Wa Gao, Lu Wang, Chao Gao, Jinqiu Liu, Yong Yang, Liuqing Yang, **Qing Shen**, Congping Wu, Yong Zhou, and Zhigang Zou; "Exquisite Design of Porous Carbon Microtubule-Scaffolding Hierarchical In₂O₃-ZnIn₂S₄ Heterostructures toward Efficiently Photocatalytic Conversion of CO₂ into CO", Nanoscale, 12, 14676-14681, (2020).
60. Jianqiang Hu, Fen Zhang, Yong Yang, Qiutong Han, Zhaosheng Li, **Qing Shen**, Yongcai Zhang, Yong Zhou and Zhigang Zou; "In situ preparation of Bi₂S₃ nanoribbon-anchored BiVO₄ nanoscroll heterostructures for the catalysis of Cr(vi) photoreduction", Catalysis Science & Technology, 10, 3843-3847, (2020).
61. Yan Shen, Qiutong Han, Jianqiang Hu, Wa Gao, Lu Wang, Liuqing Yang, Chao Gao, **Qing Shen**, Congping Wu, Xiaoyong Wang, Xin Zhou, Yong Zhou, and Zhigang Zou; "Artificial Trees for Artificial Photosynthesis: Construction of Dendrite-Structured α -Fe₂O₃/g-C₃N₄ Z-Scheme System for Efficient CO₂ Reduction into Solar Fuels", ACS Applied Energy Materials, 3/ 7, 6561-6572, (2020).
62. Hayatomomaru Morimoto and **Shouhei Kidera**; "Super-Resolution Multi-layer Structure Analysis via

- Depth Adaptive Compressed Sensing for Terahertz Subsurface Imaging", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 1-5, (2020).
63. Hiroki Sato and **Shouhei Kidera**; "Noise-robust Microwave Breast Imaging Applied to Multi-frequency Contrast Source Inversion", IEEE Journal of Electromagnetics, RF, and Microwaves in Medicine and Biology, 1-1, (2020).
 64. Hiroki Sato and **Shouhei Kidera**; "ROI Limited Unknowns Reduction based Contrast Source Inversion for Microwave Breast Imaging", IEEE Antenna Wireless Propagation Letters, 2285-2289, (2020).
 65. Yuriko Takaishi and **Shouhei Kidera**; "Noise-Robust Distorted Born Iterative Method with Prior Estimate for Microwave Ablation Monitoring", IEICE Trans. Electron, Vol.E102-C/ 1, (2020).
 66. Yoshiki Akiyama, Tomoki Omori, and **Shouhei Kidera**; "k-Space Decomposition Based Three-dimensional Imaging with Range Points Migration for Millimeter Wave Radar", IEEE Trans. Geoscience & Remote Sensing, 1-15, (2020).
 67. Takamaru Matsui and **Shouhei Kidera**; "Virtual Source Extended Range Points Migration Method for Auto-focusing Three-dimensional Terahertz Imaging", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, (2020).
 68. Kaoru Teranishi, **Kiminao Kogiso**; "ElGamal-type encryption for optimal dynamic quantizer in encrypted control systems", SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, (2021).
 69. Kaoru Teranishi, Naoki Shimada, **Kiminao Kogiso**; "Stability-guaranteed dynamic ElGamal cryptosystem for encrypted control systems", IET Control Theory & Applications, (2020).
 70. Kaoru Teranishi, Naoki Shimada, **Kiminao Kogiso**; "Development and examination of fog computing-based encrypted control system", IEEE Robotics and Automation Letters, (2020).

4.2. 【国際会議プロシーディングス等】

1. S. Endo and **S. Yokogawa**; "Trends between indoor CO₂ concentration and electricity usage through topological data analysis," 2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies, pp.530-531 (2021).
2. **T. Sogabe**, C.-Y. Hung, R. Tamaki, S. Tomic, N. Ekins-Daukes, Y. Okada; "1AO.2.3 Demonstration of GaAs-Based Energy-Transfer Ratchet Intermediate-Band Solar Cell", EU PVSEC 2020 (2020.9.7-11).
3. **Tomah Sogabe** "Hybrid Quantum Dynamic Programming and Beyond", IBM Quantum Summit 2020(2020.9.17).
4. **Shuzi Hayase**, Pb free Sn-perovskite solar cells with over 13% efficiency, SPICE, Oral Video Presentaion,2020/8/24-28.
5. **Shuzi Hayase**, Sn Perovskite solar cell-present and future-The 2nd Internationa Conference on Future Technology and Disruptive Innovation & The 310th China Engineering Science and Technology Forum, WEB, 2020/10/30.
6. **Shuzi Hayase**, Progress in perovskite solar cell, 11th International. Symposium on Organic Molecular Electronics, ISOME2020 WEB Aichi Ins. Tech. 8/7, 2020.
7. **Shuzi Hayase**, Sn Based Perovskite Solar Cells on Glass Substrate and Plastic Substrate, H02-1862/PRiME, 2020/10/6/WEB.
8. Kohei Nishimura, Muhammad Akmal Kamarudin, Daisuke Hirotsu, Kengo Hamada, **Qing Shen**, Satoshi Iikubo, Takashi Minemoto, Kenji Yoshino, **Shuzi Hayase**, Enhancement of Efficiency for Pb Free Perovskite Solar Cells Consisting of Sn²⁺ Doped with Ge²⁺, MRS Fall meeting, 2020/12/1.
9. **Shuzi Hayase**, Solar cells consisting of tin perovskite as light harvesting layer. nanoGe Spring Meeting 2021 March 9th 10:45h - 11:05h CET (18:45-19:05 (Japan time)) Abstract ID: 079.
10. Muhammad Ilham, **Tomio Okawa**, "Numerical Investigation of Safety System Parameters in Molten Salt Reactor: Wall Effect on Freeze Valve Opening Time", Proceedings of 28th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE28), ICONE28-64134 (2021).
11. **Tomio Okawa**, Tatsuya Tokushima, Indarta Kuncoro Aji, and Mahammad Ilham, "Study on melting process of solid salt contained in metal vessel", Advances in Thermal Hydraulics (ATH '20), (2020)
12. Yuusuke Kawakita, Hiroshi Tanaka, **Haruhisa Ichikawa**, and Jin Mitsugi; "Synchronous streaming protocol for back-scatter communications," IEICE International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC), (2020).
13. Kazuki Takaie, Kota Tamura, Yuusuke Kawakita, **Shinji Yokogawa**, Yoshito Tobe, and **Haruhisa Ichikawa**; "Toward efficient power delivery using USB Power Delivery hub," ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, P1-15 (Sensys 2020).
14. Kota Tamura, Yuusuke Kawakita, Yoshito Tobe, **Shinji Yokogawa**, **Haruhisa Ichikawa**, "Practical Issues in Aggregation and Distribution of Electrical Power Among USB-PD-Connected Devices," in Proc. Workshop on the Reliability of Intelligent Environments (WoRIE 2020), pp. 54-61, doi: 10.3233/AISE200024.
15. Yukari Mochizuki, **Kenji Sawada**: An analysis of expansion and reduction speeds of traffic jams on graph

- exploration, AROB 26th 2021, 319/324, 21-23. Jan. 2021. (Virtual conference, Oral, Abstract Review)
16. Kousei Sakata, Shintaro Fujita, **Kenji Sawada**: Synthesis of Resilient Third-Party Monitoring System Against Cyberattacks via Supervisory Control, IEEE ICCE 2021, 18-21, Jan. 2021 (Virtual conference, Oral, Full Paper Review)
 17. Takuma Wakasa, **Kenji Sawada**: Distributed Cooperative Partial-State Observer for Position Estimation of Vehicle Platoon, IECON2020, 186/191, 2020 (Virtual conference, 2020.10.28-31) (Full paper review)
 18. Haruka Matsushita, Kaito Sato, Mamoru Sakura, **Kenji Sawada**, Seiichi Shin, Masaki Inoue: Rear-wheel steering control reflecting driver personality via Human-In-The-Loop System, 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 356/362, 2020 (Virtual conference, 2020.10.11-14) (Full paper review)
 19. Junya Fujita, Takashi Ogura, Noritaka Matsumoto, Osamu Kaneko, **Kenji Sawada**: Investigation of Cyber Attack Emulation Methodology for Industrial Control Systems, SICE Annual Conference, 31/34, 2020 (Virtual conference, 2020.9.23-9.26-12.01) (Position paper review)
 20. Noritaka Matsumoto, Junya Fujita, Hiromichi Endo, Tsutomu Yamada, **Kenji Sawada**, Osamu Kaneko: Method of Asset-Configuration Management for Strengthening Cybersecurity of Industrial Control Systems, SICE Annual Conference, 35/38, 2020 (Virtual conference, 2020.9.23-9.26-12.01) (Position paper review)
 21. Kaito Sato, **Kenji Sawada**, Masaki Inoue, On the Instant Iterative Learning MPC for Nonlinear Systems, SICE Annual Conference, 1166/1171, 2020 (Virtual conference, 2020.9.23-9.26-12.01) (Full paper review)
 22. Takuma Wakasa, **Kenji Sawada**, Path Planning and Tracking Method for Multiple Platoons via Switched Pinning Control, SICE Annual Conference, 1159/1162, 2020 (Virtual conference, 2020.9.23-9.26-12.01) (Position paper review)
 23. Masatoshi Enomoto, **Kenji Sawada**, Shu Hosokawa: A consideration of white list creating algorithm for industrial network protocols at network switch, SICE Annual Conference, 45/50, 2020 (Virtual conference, 2020.9.23-9.26-12.01) (Full paper review)
 24. Takuma Wakasa, **Kenji Sawada**, Seiichi Shin: Event-Triggered Switched Pinning Control for Merging or Splitting vehicle Platoons, 21st IFAC World Congress, Paper ID:3004, 2020 (Virtual conference, 2020.7.13~8.31) (Full paper review)
 25. Hiroyuki Ichihara, **Kenji Sawada**, Koichi Kobayashi, Sophie Tarbouriech: Periodic Event-Triggered Control for Extended Plants of Linear Systems - A Convex Approach, 21st IFAC World Congress, Paper ID:1021, 2020 (Virtual conference, 2020.7.13~8.31) (Full paper review)
 26. **Shohei Kidera**, "B06: Inverse Scattering and Imaging" and "KB1 : Electromagnetic Biomedical Imaging and Inversion", 2020 URSI General Assembly (URSI GASS August, 2020)

4.3. 【国内会議、学会口頭発表等】

1. 浅野実, **横川慎二**; "ユーザーの利用調査データに基づくモバイル端末のバッテリー劣化傾向の診断," 電子情報通信学会信学技法, R2020-36 (2021).
2. 中里諒, 野秋拓真, **横川慎二**, **市川晴久**, 後川知仁, 武田隆; "航空 LiDAR データと GIS ソフトウェアを用いた太陽光沿面発電における検討," 電子情報通信学会信学技法, EE2020-25 (2021).
3. **横川慎二**, 浅野実, 中里諒; "分散電力の統合とグリッドレジリエンス確保のためのデバイス識別と蓄電池診断技術," 第 63 回自動制御連合講演会, 2H4-5 (2020).
4. 遠藤駿, **横川慎二**; "環境・エネルギーセンサーネットワークデータの位相的データ解析を用いた空間環境評価," 第 33 回秋季信頼性シンポジウム, S5-2 (2020).
5. 浅野実, **横川慎二**, **市川晴久**; "自律分散グリッドのセキュリティ確保のための機械学習によるデバイス識別方法," 第 33 回秋季信頼性シンポジウム, S5-1 (2020).
6. 中里諒, **横川慎二**; "リチウムイオン二次電池の内部状態を考慮した階層ベイズによる容量劣化診断," 第 33 回秋季信頼性シンポジウム, S2-1 (2020).
7. **横川慎二**, 石垣陽, 遠藤駿, 高原廉, 川内雄登; "Ambient Intelligence (環境知能) によるフリーアドレススペースのリスク評価," 第 11 回横幹連合コンファレンス, C-1-4 (2020).
8. 中里諒, **横川慎二**; "電気化学インピーダンス法と階層ベイズによるリチウムイオン二次電池の容量劣化量診断," 電子情報通信学会信学技法, R2020-10 (2020).
9. 斯波 廣大, Chen Chih-Chieh, 曾我部 完, 坂本 克好, **山口 浩一**, **曾我部 東馬**: 「量子近似最適化アルゴリズム(QAOA)を用いた複数制約条件付き最適化問題への応用」、2020 年(令和 2 年)第 34 回人工知能学会全国大会 (2020.6.9-12) .
10. 木村 友彰, Malla Dinesh, 曾我部 完, 坂本 克好, **山口 浩一**, **曾我部 東馬**: 「部分観測マルコフ決定過程(POMDP)を用いた 異常前兆予測検知手法の開発」、2020 年(令和 2 年)第 34 回人工知能学会全国大会 (2020.6.9-12) .
11. Malla Dinesh, 木村 友彰, 曾我部 完, 坂本 克好, **山口 浩一**, **曾我部 東馬**: 「ベイジアン逆強化学習を用いた異常前兆予測検知手法の開発」、2020 年(令和 2 年)第 34 回人工知能学会全国大会 (2020.6.9-12) .
12. 高柳 里紗, Malla Dinesh, 酒井 剛, **曾我部 東馬**: 「深層強化学習を用いたアメリカンフットボールコーチング戦略の研究」、2020 年(令和 2 年)第 34 回人工知能学会全国大会 (2020.6.9-12) .
13. Chen Chih-Chieh, 斯波 廣大, 曾我部 完, 坂本 克好, **曾我部 東馬**: 「ハイブリッド量子古典的 Ulam-von Neumann 線形ソルバーベースの量子動的プログラミングアルゴリズムの開発」、2020 年(令和 2 年)第 34 回人工知能学会全国大会 (2020.6.9-12) .
14. Sung Jaebok, 高橋 慧, Malla Dinesh, 坂本 克好, **山口 浩一**, **曾我部 東馬**: 「深層強化学習を用いた AGV 搬送システムのオンライン最適化」2020 年(令和 2 年)第 34 回人工知能学会全国大会 (2020.6.9-12) .
15. Sogabe Reed, 木村 友彰, Malla Dinesh, 曾我部 完, 坂本 克好, **曾我部 東馬**: "Bootstrapping Bayesian Inverse Reinforcement Learning in Robotics through VR Demonstration", 2020 年(令和 2 年)第 34 回人工知能学会全国大会 (2020.6.9-12) .
16. ChihChieh Chen, 斯波 廣大, 曾我部 完, 坂本 克好, **曾我部 東馬**: "Q-learning for square lattice Ising model", 2020 年(令和 2 年)第 81 回応用物理学会秋季術講演会 (2020.9.8-11) .
17. 斯波 廣大, 坂本 克好, **山口 浩一**, 沈 青, 岡田 至崇, **曾我部 東馬**: 「AI 予測最適化手法を用いた

ペロブスカイト/PbS コロイド量子ドット中間バンド太陽電池の逆設計」2020年（令和2年）第81回応用物理学会秋季術講演会（2020.9.8-11）。

18. 曾我部 東馬, Dinesh Malla, 坂本 克好：“再生エネルギーミックスにおける深層強化学習予測・最適化技術の開発”, 第63回自動制御連合講演会(2020.11.21-22)
19. 吉田 響、坂本 克好、山口 浩一、沈 青、岡田 至崇、曾我部 東馬：“コアシェル量子ドットの光物性予測における第一原理計算と AI 逆設計 手法の応用”, 第68回応用物理学会春季学術講演会(2021.3.16-19).
20. 熊倉 健太、坂本 克好、曾我部 東馬：“強化学習を用いた量子井戸の電荷型量子ビットの電磁波の振幅の最適化”, 第68回応用物理学会春季学術講演会(2021.3.16-19).
21. 斯波 廣大、坂本 克好、山口 浩一、沈 青、岡田 至崇、曾我部 東馬：“連続行動型深層強化学習を用いた半透明薄型中間バンド太陽電池の3次元逆設計”, 第68回応用物理学会春季学術講演会(2021.3.16-19).
22. 早瀬修二；プリンタブル・ペロブスカイト太陽電池研究の現状と将来動向、第169総研セミナー・次世代の太陽電池発電システム, WEB,(1/20.2021).
23. 早瀬修二；Sn系ペロブスカイト太陽電池研究の現状、日本太陽光発電学会ペロブスカイト太陽電池分科会、(共催：有機系太陽電池技術研究組合), WEB, (2021/2/12).
24. 早瀬修二；Pb free Sn ペロブスカイト太陽電池の研究開発動向, 応用物理学会・多様な安定相のエンジニアリングの新展開, WEB, (2020/9/8).
25. 早瀬修二；鉛フリー錫系ペロブスカイト太陽電池の研究開発動向電子情報・電気学会連載研究会, (2021/3/1).
26. 市川晴久, 横川慎二, 戸辺義人, 川喜田佑介：超小型電力システムを単位に再構成可能なマイクログリッド, 第63回自動制御連合講演会, 2H4-1 (2020).
27. 川喜田佑介, 高家和暉, 田村光汰, 戸辺義人, 市川晴久, 横川慎二：USB-PDによるポリシーアウェアDCパワーネットワークワーキング, 第63回自動制御連合講演会, 2H4-2(2020).
28. 後川知仁, 武田隆, 中里諒, 横川慎二, 市川晴久：特定地域における太陽光発電のポテンシャルに関する基礎的検討, 電子情報通信学会電子通信エネルギー技術研究会, EE2020-24(2021-01).
29. 中里諒, 野秋拓真, 横川慎二, 市川晴久, 後川知仁, 武田隆：航空LiDARデータとGISソフトウェアを用いた太陽光発電における検討, 電子情報通信学会電子通信エネルギー技術研究会, EE2020-25(2021-01).
30. 高家和暉, 田村光汰, 戸辺義人, 川喜田佑介, 横川慎二, 市川晴久：USB-PDハブによる電力配信の効率化に向けた制御検討, 令和3年電気学会全国大会(2021.3).
31. 松本典剛, 藤田淳也, 遠藤浩通, 山田勉, 澤田賢治, 金子修：産業制御システムのセキュリティを強化する資産管理手法, MSCS2021, 1H1-3 (2021.3.1-4)
32. 藤田淳也, 小倉貴志, 松本典剛, 澤田賢治, 金子修：産業制御システム向けサイバー攻撃エミュレーション技術の調査, MSCS2021, 1H1-4 (2021.3.1-4)
33. 藤田真太郎, 澤田賢治, 細川嵩：シーケンス制御のホワイトリスト式異常検知のための並列動作のモデル化, MSCS2021, 1C1-2 (2021.3.1-4)
34. 佐藤海斗, 澤田賢治, 井上正樹：連続時間最適化アルゴリズムによる線形モデル予測制御と受動性に基づく収束性解析, MSCS2021, 2D1-1 (2021.3.1-4)
35. 若狭拓馬, 澤田賢治：車群速度制御のためのスパースピニング制御, MSCS2021, 2D2-4 (2021.3.1-

4)

36. 阪田恒晟, 藤田真太郎, 澤田賢治: 制御システムに対する縮退運転ロジックの設計, MSCS2021, 1C2-3 (2021.3.1-4)
37. 池田佳輝, 阪田恒晟, 藤田真太郎, 澤田賢治: 有限オートマトンモデルに基づく複数攻撃に対する異常検知と異常箇所推定, MSCS2021, 1C2-1 (2021.3.1-4)
38. 柴原将太郎, 若狭拓馬, 澤田賢治: 複数列縦隊移動するロボット群の障害物回避のためのネットワーク重み関数, MSCS2021, PS1-11 (2021.3.1-4)
39. 堀内柚那, 山藤勝彦, 澤田賢治: ドライバの予見動作を支援する MPC 型自動運転システムに関する研究, MSCS2021, PS1-10 (2021.3.1-4)
40. 長谷川亮太, 澤田賢治: ガウス過程回帰の信頼区間を利用した制御システムの時系列異常検知, SCIS2021, 3E3-1 (2021.1.19-22)
41. 阪田恒晟, 藤田真太郎, 澤田賢治: 制御システムに対する縮退運転のためのモデル化とシミュレーション解析, SCIS2021, 3E3-2 (2021.1.19-22)
42. 池田佳輝, 阪田恒晟, 藤田真太郎, 澤田賢治: 複数攻撃を想定した有限オートマトンモデルによる異常検知と特定, SCIS2021, 3E3-3 (2021.1.19-22)
43. 藤田真太郎, 澤田賢治, 細川嵩: コントローラホワイトリスト生成のための制御プログラム構造, SCIS2021, 3E3-5 (2021.1.19-22)
44. 澤田賢治: 小型マイクログリッドにおける協調給電プロトコルと正当性検証のためのモデル化, 第 63 回自動制御連合講演会, 2H4-3 (2020.11.21-22)
45. 若狭拓馬, 澤田賢治: 分散協調部分状態オブザーバを用いた車群位置推定における補間関数のスパーズモデリング手法, 第 63 回自動制御連合講演会, 2F3-1 (2020.11.21-22) 新型コロナウイルスによりオンライン開催 (優秀発表賞)
46. 佐藤海斗, 澤田賢治, 井上正樹: 連続時間最適化アルゴリズムによる非線形モデル予測制御の提案, 第 63 回自動制御連合講演会, 2F1-3 (2020.11.21-22)
47. 阪田恒晟, 藤田真太郎, 澤田賢治, 新誠一: サイバー攻撃に対するレジリエントな第三者監視システムのモデル化, 第 63 回自動制御連合講演会, 1F1-5, (2020.11.21-22)
48. 藤田真太郎, 澤田賢治, 新誠一, 細川嵩: 制御システムに対する協調型ホワイトリストの検討, SSI2020, 171-175 (2020.11.15-17)
49. 若狭拓馬, 武藤僚佑, 澤田賢治: プラトーン走行における分散協調オブザーバを用いた位置推定, 第 64 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'20), 624-631 (2020.5.20-22)
50. 佐藤海斗, 澤田賢治, 井上正樹: 非線形システムに対する instant iterative learning MPC の提案, 第 64 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'20), 681-685 (2020.5.20-22)
51. 阪田恒晟, 藤田真太郎, 澤田賢治, 新誠一: サイバー攻撃に対するレジリエントな第三者監視システムの構築, 第 64 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'20), 440-446 (2020.5.20-22)
52. Koichiro Ishibashi, Jiro Ida, Kenji Itoh, Shigeru Makino, Ryo Ishikawa, and Koji Ishibashi; "The Project for Industrialization of RF Energy Harvesting Technology by JST CREST", Advanced Wireless Communications, Energy Harvesting and IoT Sensors for Smart Monitoring Systems, 1, (2020).
53. Maki Kajiura, Yuta Yoshikawa and Koichiro Ishibashi; "Low-Power and Long-Range Water Level Monitoring Beat Sensor with LoRa modules", Advanced Wireless Communications, Energy Harvesting and IoT Sensors for Smart Monitoring S

- systems, 1, (2020).
54. 辻本英之、石橋孝一郎、孫光鎬;"マイコンを用いたドップラーレーダ信号による高精度心拍検出", 電子通信情報学会総合大会, 1, (2020).
 55. 熊谷洸貴・石橋孝一郎・孫光鎬;"非接触医用レーダと品質評価機械学習による高信頼感染症スクリーニング", 電子情報通信学会、ニューロコンピューティング研究会 (NC), 1, (2020).
 56. Yuki Iwata, **Koichiro Ishibashi**, Guanghao Sun, Luu Manh Ha, Han Trong Thanh, Nguyen Linh Trung, and Do Trong Tuan;"Non-contact Heartbeat Detection by using CW-Doppler Radar under Respiratory Artifact", The 2nd ASEAN UEC Work Shop on AI and Energy, 1, (2020).
 57. 石黒 翔太、井田 次郎、森 貴之、石橋 孝一郎;"急峻な SS を持つ“PN-Body Tied SOI-FET”の CMOS インバータ伝達特性", 一般社団法人 電子情報通信学会 信学技報, 1, (2020).
 58. 岩田 勇樹, 石橋 孝一郎, 孫 光鎬, ルー マンハ, ハン チョンタイン, グエン リンチュン, ド チョントゥアン;"CR-SSA による呼吸及び体動下での非接触な心拍検出", 第 59 回日本生体医工学会, 1, (2020).
 59. 植村友紀, 渡邊洋平, 李陽, 三浦典之, 岩本貢, 崎山一男, 太田和夫;"レーザー検知回路から漏洩するサイドチャンネル情報の考察", 2021 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2021), 2B3-2/1(2021).
 60. 高木翼, 李陽, 崎山一男, 菅原健, 梨本翔永, 鈴木大輔;"FPGA を用いた秘匿アクセラレーションの実装評価 (II) ", 2021 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2021), 4D1-3/1(2021).
 61. 工藤黎, 菅原健, 崎山一男, 原祐子, 李陽;"サイドチャンネル攻撃の並列実装におけるシステムノイズの評価: 遺伝的アルゴリズムとの比較", 2021 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2021), 2D1-3/1(2021).
 62. Go Takato, Takeshi Sugawara, **Kazuo Sakiyama**, Yuko Hara-Azumi, Yang Li; "Pushing the Limits of Simple Electromagnetic Analysis Against Similar Activation Functions", 2021 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2021), 2D3-5/1(2021).
 63. 星野翔, 崎山一男;"ローリングシャッター効果を用いた LED デバイスの物理指紋抽出に関する基礎的実験", 2021 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2021), 3D3-4/1(2021).
 64. 畑碧, 崎山一男;"塗布剤による個人情報の秘匿性評価", 2021 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2021), 2B3-1/1(2021).
 65. 日良僚太, 李陽, 原祐子, 崎山一男;"NIST 軽量暗号第 2 ラウンド候補のソフトウェア実装に向けた調査", 2021 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2021), 3D4-4/1(2021).
 66. 平田遼, 羽田野凌太, 李陽, 三浦典之, 崎山一男;"M&M により対策された AES 暗号ハードウェアに対するサイドチャンネル攻撃", 2021 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2021), 3D4-4/1(2021).
 67. 平田遼, 羽田野凌太, 李陽, 三浦典之, Svetla Nikova, 崎山一男;"M&M により対策された AES ハードウェアの安全性評価について", IEICE2020 年ソサイエティ大会, 3D4-4/1(2021).
 68. 日良僚太, 李陽, 原祐子, 崎山一男;"NIST 軽量暗号の第 2 ラウンド候補の軽量実装に向けた分類と比較", IEICE2020 年ソサイエティ大会, 3D4-4/1(2020).
 69. 土屋彩夏, 藤聡子, 李陽, 崎山一男, 菅原健;"LED の個体識別における温度変化の影響", ICSS2019-72, 3D4-4/1(2020).
 70. 岡本拓実, 藤本大介, 崎山一男, 李陽, 林優一;"順序回路への故障注入に起因した不均一な頻度分布

を持つ誤り出力を用いた故障利用解析", HWS2019-101(2020).

71. K. Sasaki, Y. Tanaka and **K. Yamaguchi**; "Fabrication of InAs Quantum Dots on Fused Silica Substrates by Molecular Beam Deposition", The 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference, (2020).
72. 畝木 唯, **金子 修**; "ERIT による入力予測を用いた非最小位相系への目標値応答の更新", 計測自動制御学会第 8 回制御部門マルチシンポジウム, 3F2-2 (2021).
73. 石津裕太郎, **金子 修**; "あるクラスの構造的不確かさをもつシステムに対する Kharitonov の定理を用いたデータ駆動制御", 計測自動制御学会第 8 回制御部門マルチシンポジウム, 3C2-5 (2021).
74. 鈴木元哉, **金子 修**; "閉ループ実験の出力信号を用いたデータ駆動予測", 計測自動制御学会第 8 回制御部門マルチシンポジウム, 2G1-3 (2021).
75. 池崎 太一, **金子 修**; "産業制御システムのセキュリティを強化する資産管理手法", 計測自動制御学会第 8 回制御部門マルチシンポジウム, 1G2-2 (2021).
76. 飯塚 悠介, **金子 修**; "1 入出力 Max-Plus 線形システムにおける入力推定可能条件", 電気学会 C 部門分野横断型新システム創成研究会, TSI-21-008 (2021).
77. 畝木 唯, **金子 修**; "入力制限を考慮した目標値応答更新を伴う ERIT", 第 63 回自動制御連合講演会, 2G4-5 (2021).
78. 鈴木元哉, **金子 修**; "有限インパルス応答推定による一自由度系のデータ駆動予測", 第 63 回自動制御連合講演会, 2G3-4 (2021).
79. 池崎太一, **金子 修**; "VIMT を用いた I-PD 制御系に対するリアルタイム制御器更新", 第 63 回自動制御連合講演会, 2G3-4 (2021).
80. 樋口 奎, **金子 修**; "入力と出力にむだ時間をもつ多入出力系に対するスミス補償器の一構成法と FRIT", 第 63 回自動制御連合講演会, 2G3-1 (2021).
81. 飯塚 悠介, **金子 修**; "Max-Plus 線形システムにおける入力推定可能条件に基づくパラメータ推定", 第 63 回自動制御連合講演会, 1F1-4 (2021).
82. 飯塚 悠介, **金子 修**; "Max-Plus 線形システムにおける入力推定可能条件と外乱オブザーバへの応用", 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2020, GS5-1-4 (2021).
83. 池崎太一, **金子修**; "データ駆動制御の汎用的ツールとしての Python の活用", 第 64 回システム制御情報学会 研究発表講演会, TS03-8/- (2021).
84. 井堀礼晶, **金子修**, 宅島勉; "精密加工用ならい制御装置における外乱除去を目的としたテーブル型ゲインのデータ駆動型更新", 第 64 回システム制御情報学会 研究発表講演会, GS06-4/- (2021).
85. 廣岡優樹, **金子修**; "入力制限を考慮したデータ駆動予測に基づく制御器と目標応答の同時更新", 第 64 回システム制御情報学会 研究発表講演会, GS05-4/- (2021).
86. 飯沼楓, **小木曾公尚**, "人の非合理的な意思決定を誘因する感情ダイナミクスの定式化", 第 8 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, (2021/03/01).
87. 宮崎, 菅野, 川瀬, **小木曾**, 川嶋, "空気圧駆動系のための波変数を用いた力帰還型バイラテラル暗号化制御", 第 8 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, (2021/03/01).
88. 新昂也, 寺西郁, **小木曾公尚**, "非線形コントローラの多項式近似による空気圧人工筋アクチュエータの関節角度と剛性の暗号化同時制御", 第 8 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, (2021/03/01).

89. 川瀬廣明, 寺西郁, 小木曾公尚, "暗号化制御系における動的量子化器のパラメータと量子化誤差の関係について", 第 8 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, (2021/03/01).
90. 寺西郁, 小木曾公尚, "暗号化状態フィードバック制御系のための動的量子化器", 第 8 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, (2021/03/01).
91. 寺西郁, 小木曾公尚, "制御システムの秘匿化のための動的鍵暗号とその安全性証明", 暗号と情報セキュリティシンポジウム, (2021/01/19).
92. 増田倫也, 小木曾公尚, "ADMM を用いた暗号化モデル予測制御の数値的考察", 第 63 回自動制御連合講演会, (2020/11/21).
93. 新昂也, 小木曾公尚, "拮抗構造を有する空気圧人工筋アクチュエータのモデル化およびセンサレス制御への応用", 第 63 回自動制御連合講演会, (2020/11/21).

4.4. 【著書】

1. 曾我部東馬ら共著: 「工場・製造プロセスへの I o T ・ A I 導入と活用の仕方」, 技術情報機構, (2020/06/30).
2. 曾我部東馬: 「Python による異常検知」, オーム社, (2021/2/26).
3. 澤田賢治: 工場・製造プロセスへの IoT・AI 導入と活用の仕方, 12 章第 2 節「モデルベース開発と制御システムセキュリティ」の執筆担当, 情報技術協会, (2020/6/30).
4. 山口浩一: 「半導体光デバイス」, コロナ社, (2020).
5. 山本 透, 金子 修, 脇谷 伸, 木下拓矢, 大西義浩, 久下本秀和, 小岩井一茂; 「データ指向型 PID 制御」, 森北出版, (2020).

4.5. 【解説記事】

1. 横川慎二; "故障物理に基づくワイブル解析の拡張", 日本信頼性学会誌, Vol. 42, pp.110-115 (2020).
2. 藤田真太郎, 澤田賢治, コントローラホワイトリストの自動化と検証, 計測と制御, Vol. 60, No. 1, 21/26, (2021).
3. 澤田賢治, コントローラに対するホワイトリスト式サイバー攻撃検知, 化学工業, Vol. 72, No. 1, 62/7, (2021).

4.6. 【招待講演】

1. 横川慎二: 「学修空間における環境センシングデータの活用」, UEC Agora ミニシンポジウム, 電気通信大学 附属図書館 Ambient Intelligence Agora 運営委員会 (2021/3/4).

2. 曾我部東馬:「ハイブリッド量子古典機械学習および最適化アルゴリズムの開発における好機と課題」, データアントレプレナーコンソーシアム データサイエンス・ワーキンググループ第四回ミーティング, 電気通信大学 (2020/11/26).
3. Tomah Sogabe: “Opportunities and challenges for developing hybrid quantum-classical machine learning and optimization algorithms”, D2T Special Seminar, The University of Tokyo (2020/9/18).
4. 曾我部東馬:「製造・加工業におけるディープラーニングによる異常検知・欠陥予測とその応用」トリケップス社主催セミナーにて1日コース講師を担当 (2020/8/25) .
5. 曾我部東馬:「人工知能 (AI) による最適化解の学習・予測」情報機構社主催のセミナーにて1日コース講師を担当 (2020.10.5) .
6. 曾我部東馬:「人工知能 (AI) による最適化解の学習・予測」トリケップス社主催セミナーにて1日コース講師を担当 (2020/11/30) .
7. 曾我部東馬:「人工知能 (AI) による最適化解の学習・予測」技術情報協会主催セミナーにて1日コース講師を担当 (2021/3/8) .
8. Shuzi Hayase: Pb free Sn-perovskite solar cells with over 13% efficiency, SPIE, Oral Video Presentation, (2020/8/24-28).
9. Shuzi Hayase: Sn Perovskite solar cell-present and future- The 2nd International Conference on Future Technology and Disruptive Innovation & The 310th China Engineering Science and Technology Forum, WEB, (2020/10/30).
10. Shuzi Hayase: Progress in perovskite solar cell, 11th International. Symposium on Organic Molecular Electronics, ISOME2020 WEB Aichi Ins. Tech, (8/7, 2020).
11. Shuzi Hayase: Sn Based Perovskite Solar Cells on Glass Substrate and Plastic Substrate, H02-1862/PRiME, WEB, (2020/10/6).
12. Kohei Nishimura, Muhammad Akmal Kamarudin, Daisuke Hirotsu, Kengo Hamada, Qing Shen, Satoshi Iikubo, Takashi Minemoto, Kenji Yoshino, Shuzi Hayase: Enhancement of Efficiency for Pb Free Perovskite Solar Cells Consisting of Sn²⁺ Doped with Ge²⁺, MRS Fall meeting, (2020/12/1).
13. Shuzi Hayase, Solar cells consisting of tin perovskite as light harvesting layer. nanoGe Spring Meeting 2021 March 9th 10:45h – 11:05h CET (18:45-19:05 (Japan time)) Abstract ID: 079.
14. 早瀬修二 プリントابل・ペロブスカイト太陽電池研究の現状と将来動向、第 169 総研セミナー・次世代の太陽電池発電システム, WEB, (2021/1/20).
15. 早瀬修二: Sn 系ペロブスカイト太陽電池研究の現状, 日本太陽光発電学会ペロブスカイト太陽電池分科会, (共催: 有機系太陽電池技術研究組合) , WEB, (2021/2/12).
16. 早瀬修二: Pb free Sn ペロブスカイト太陽電池の研究開発動向, 応用物理学会・多様な安定相のエンジニアリングの新展開・2020/9/8/WEB.
17. 早瀬修二: 鉛フリー錫系ペロブスカイト太陽電池の研究開発動向電子情報・電気学会連載研究会 2021/3/1 13:10-13:50
18. 大川富雄: “The 2nd ASEAN-UEC Workshop on Energy and AI, 2020” , (2020/11/21).
19. 大川富雄:「第 23 回 UEC アライアンスセンターICT ワークショップ」, (2020/12/2).
20. 早瀬修二, 大川富雄, 市川晴久:「第 2 回新技術紹介フェア エネルギー分野を中心に電通大の研究テーマを紹介します」, (2021/3/8).

21. 澤田賢治：FA 用 3D シミュレータによるセキュリティ検証用ベンチマークモデル開発の提案～制御システムのホワイトリスト～，FAOP 技術セミナー2021, (2021/03/18).
22. 澤田賢治：【ガイオ・テクノロジーの WEB セミナー】制御システムのセキュリティを強化するホワイトリスト ， G サイバーチャンネル, (2021.2.15).
23. 澤田賢治：【ガイオ・テクノロジーの WEB セミナー】モデルベース開発のためのエネルギー検証に基づくバグ検知 ， G サイバーチャンネル, (2021.1.27).
24. 澤田賢治：制御システムセキュリティ：動くモノを守る技術，電気通信大学新技術紹介フェア 2020 秋, (2020/11/25).
25. 澤田賢治：制御システムのための多階層型セキュリティ機能の開発，先端制御セミナー，第 63 回自動制御連合講演会, (2020/11/21).