

iPERC2019

—令和元年度活動報告—
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	スマートエネルギーシステムの最適化における最先端人工知能手法の応用と量子アルゴリズムの開発 (曾我部 東馬准教授)	3
2.2	制御系セキュリティに関する研究 (澤田 賢治准教授)	12
2.3	エネルギーインフラのシステムレジリエンス確保に向けた研究 (横川 慎二教授)	27
2.4	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)	42
2.5	スマートオフィスにおけるエネルギー消費と生産性に関する実証環境の構築 (横川 慎二教授)	51
2.6	次世代プリンタブル太陽電池・熱電素子の研究開発と新応用分野の開拓 (早瀬 修二特任教授)	64
2.7	溶融塩炉フリーズプラグに関する研究 (大川 富雄教授)	77
3	活動一覧	82
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	86
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-パワードエネルギー・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、私が iPERC のセンター長を務めております。

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年は、iPERC の設立から5年目の年となりました。このため、これまでの活動を総括するとともに、今後の活動指針策定の参考とするため、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。

ソリューション研究を標榜する iPERC としては、中間評価でいただいたコメントはきわめて貴重であり、その実現に向けて今後の活動を行って参る所存です。このためには、現 iPERC メンバーの個々の研究活動を推進するとともに、これらを有機的に統合して、ソリューション研究の観点でより有意義な成果を得ることが重要と考えております。

本冊子では、2019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。

2019 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	中野 和司	
理事	田中 勝己	
教授	石橋 孝一郎	情報・ネットワーク工学専攻
教授	桐本 哲郎	機械知能システム学専攻
教授	崎山 一男	情報学専攻
教授	新 誠一	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	

【協力教員】

教授	金子 修	機械知能システム学専攻
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

【客員教授】

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 スマートエネルギーシステムの最適化における最先端人工知能手法の応用と量子アルゴリズムの開発

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. 2019 年度計画概要

本年度は、昨年度開発したグラフ CNN を現実問題に適用し、実社会のインフラ問題におけるグラフ CNN 手法の効果検証と改良を行った。我々が独自に開発した距離行列カーネルを導入した手法は、有効性はあるものの距離行列を計算するために計算時間が長くなり計算自体が非効率的に陥ってしまうという問題点があった。それを克服するために、距離境界を設けることで計算の高効率化を図った。高次元の空間に、ある一定の距離からなる密度球が存在する。設定した距離によって球に入るデータが変化し、密度の変化につながる。その仕組みについては実施内容 1 で詳しく説明する。また本年度、我々は深層強化学習アルゴリズムをロボスト制御問題に適用し、不規則、複雑かつ非線形性を持つ外乱という古典制御理論では非常に対応困難な環境においても、エージェントが接待した目標を達成できる手法を開発した。最後に、量子アルゴリズムについては、昨年度までは量子アニーリング方式の量子コンピュータの研究に特化してきたが、本年度から本格的に現在主流となっている量子ゲート方式の量子コンピュータ用の量子アルゴリズムの開発に着手した。着目しているのは、画像解析の分野における画像のノイズ除去という課題である。我々は独自に開発した量子畳み込み自己符号化器を用いることで、わずか 9 量子ビットの量子コンピュータを用いて、元来、数百量子ビット必要とされる大きな画像のノイズ除去に成功した。この内容の詳細については実施内容の 2 で展開する。

(1) 機械学習を用いた半導体搬送システムにおける目的地到着時刻の予測

当研究内容は主に産学連携における企業との共同研究の一環として「機械学習を用いた半導体搬送システムにおける目的地到着時刻の予測」(研究期間：平成 30 年度～令和元年度)として村田機械株式会社と電気通信大学において実施した。

本プロジェクトでは、多くのサンプルと特徴量を持つ交通データセットに対して、高次元空間におけるデータの密度球(Density Sphere)に基づいたクラスタリングを行い、特徴量から距離行列を作成することで畳み込みを行う Density Sphere GraphCNN を用いて渋滞を予測した。密度球とは、高次元空間におけるデータのクラスタリングの基準となる密度を表現したものであり、データの相関と距離を両方考慮してデータの関係性を見ることが出来る。渋滞を再現した交通シミュレーションモデルと GraphCNN を組み合わせることで渋滞の度合いを予測、また密度球の違いによる予測精度を比較し、その結果に基づいて高精度な渋滞予測を実現するメカニズムを検討した。その結果、提案手法である Density Sphere GraphCNN は、他の GraphCNN の予測精度を上回り、密度球の有用性が証明された。

(2) アルファゼロ型強化学習アルゴリズムを用いた最適制御手法の開発

当研究内容は主に、産学連携における企業との共同研究の一環として、機械学習の基礎開発を主眼に電気通信大学と株式会社グリッドにおいて実施してきた。古典制御理論においては、システムに非線型成分、外乱が存在する場合やシステムの詳細を知ることができないなどの場合は、システムを数式化し解析することが困難になる。そのため現在でも複雑なシステムにおいてはPID制御が用いられ、試行錯誤を通じてパラメータを調整する手法が使われている。これに対して、本研究は柔軟に関数を近似できるニューラルネットワークと環境に対して事前知識を必要とせず、探索に通じて行動を最適化する強化学習を用いて、非線型成分、外乱が含まれる複雑なシステムにおける制御の最適化を試みた。本プロジェクトではGoogle DeepMind社が発表したAlphaZeroの論文に基づき、AlphaZero強化学習アルゴリズムを再現し、最適制御問題に対してAlphaZero型強化学習アルゴリズムの有効性を検証し、アルファゼロを最適制御問題に応用できることを実証した。

(3) 量子シミュレーターを用いた畳み込み型量子自己符号化器の開発

当研究内容は主に産学連携における企業との共同研究の一環として、機械学習の基礎開発と3者共同プロジェクト（東京大学、電気通信大学、株式会社グリッド）として実施した。

量子ゲート方式量子コンピュータは、解く問題に応じて量子ゲートを組み合わせて量子回路を構築できるため、汎用性が高く数十年後の実用化が期待できる。しかし、量子ゲート方式の量子コンピュータの量子ビットは、外部からの干渉に非常に弱く、量子状態を長時間維持することが難しい。そのため、量子ビット数が多くなるほどノイズが含まれやすく、誤り訂正機能も実装できない。また、従来の量子ゲート方式量子コンピュータでの量子計算を再現できる量子シミュレーターにおいても、量子ビット数を増やすごとに計算時間が指数関数的に上昇するため、数多くの量子ビットを使用する必要があるビッグデータの計算にはかなりの時間が必要となり、現実的ではない。本プロジェクトでは、この問題の解決策として、機械学習で用いられている手法の1つである畳み込みを量子計算に適用する計算手法を提案した。例としてこの手法を、量子アルゴリズムの1つである断熱量子計算を応用した量子自己符号化器に適用し、数量子ビットで構成した畳み込みフィルターを用いて数百量子ビット以上の量子計算を行う有効性について検証した。その結果、正確度は劣るものの畳み込み量子計算の有効性が実証された。

II. 研究実施状況

(1) 機械学習を用いた半導体搬送システムにおける目的地到着時刻予測の開発状況

本内容は、2019年第33回人工知能学会全国大会(JSAI2019)にて発表した。WITNESSTM という汎用シミュレーションソフトウェアを用いて、高速道路で渋滞が発生する要因を再現した簡易的なモデルを作成した。そのモデルを図1に示す。高速道路で渋滞が発生する要因は主に4つあり、サグ部と呼ばれる下り坂から上り坂にさしかかる凸部、トンネル、合流部、そして出口である。渋滞の予測には通常、ある時刻にどれくらいの車が特定のエリア内にいたかという統計データと、そしてどの程度の渋滞が発生したかという道路状況を示すデータが必要になる。今回の実験では、モデルに常時数十台の車を走らせて各エリアごとの車の台数、および車ごとの走行時間を出し、5510サンプル8つの特徴量を持つデータセットを作成し、学習に用いた。

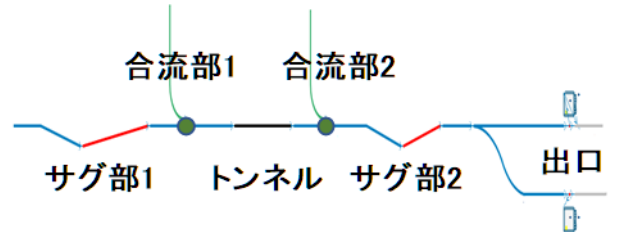


図1 WITNESSTMで作成した高速道路のモデル

次に作成したデータセットの特徴量がどのような関係性を持っているかを調べた。図2にデータセットの関係性を表す。左上が特徴量同士の相関行列、右上がガウシアンカーネルにより求められたデータ間の距離行列、そして左下が密度球においてQ=2のときの距離行列、右下がQ=4をにしたときの距離行列である。ガウシアンカーネルは以下のように表される式であり、

$$k(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{\sigma^2}\right)$$

データ (x_i, x_j) 間の距離が近いほど値は1に近づく。マス色が白に近いほど特徴量はお互いの変動をよく表している。図2を見ると、同じデータから生成したにもかかわらず、どの行列も異なる関係性を表していることが分かる。このように用いる手法によって、データ間の重要度が

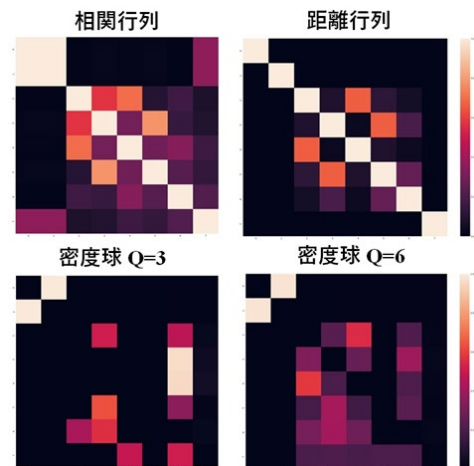


図2 データセットの特徴量の相関図と密度球の半径との関係

変わってくるため、学習の際に真にデータの関係性を表している行列を選択することが重要になる。実験としては、畳み込みを2回繰り返す全7層の構造を持つDensity Sphere GraphCNN(D-GCNN)を用いた。また比較のため相関行列を利用したCorrelation-GraphCNN(C-GCNN)、距離行列を利用したKernel-GraphCNN(K-GCNN)、他に回帰予測において一般的に用いられているNeural Network, RandomForest, XGBoost, LightGBMでも実験を実施した。前述の7個の手法を用いて、車の走行時間(s)の予測を行った。分析の評価にはRMSEを用いた。3つのGraphCNNの構成において、畳み込み1層目は15枚、2層目は20枚のフィルタ、全結合層のユニット数は64個、反復回数は300回というパラメータ設定を共通に用いた。

実験結果を図3(左)に示す。GraphCNNを用いた3つの構成の精度は、従来のニューラルネットワ

ークの精度を大きく上回るといえることが分かる。GraphCNNは他の手法よりも精度が高く、さらに D-GCNN は最も精度が良いことが分かる。次に、密度球の密度 Q の違いによる予測精度の差を図 3 (右) に示す。Q=3 の時が最も良い精度を持つことが分かった。クラスタリングの際の空間密度は予測精度に影響を与え、密すぎても疎すぎても良くないことが分かる。

表 1 各手法における渋滞分類の正答率

Method	正答率 (%)
NN	71.0
RandomForest	68.4
XGBoost	73.0
LightGBM	72.9
Correlation GraphCNN	72.6
Kernel GraphCNN	72.8
Density Sphere GraphCNN	73.3

次に同じデータにおいて、走行時間を「渋滞なし」「やや渋滞」「渋滞」の 3 クラスに分類し、渋滞の度合いを判断する分類問題を行った。その結果を表 1 に示す。表 1 より D-GCNN がわずかに他の手法の精度を上回っていることが明らかとなり、提案手法である Density Sphere GraphCNN は、他の GraphCNN の予測精度を上回り、密度球の有用性が証明された。

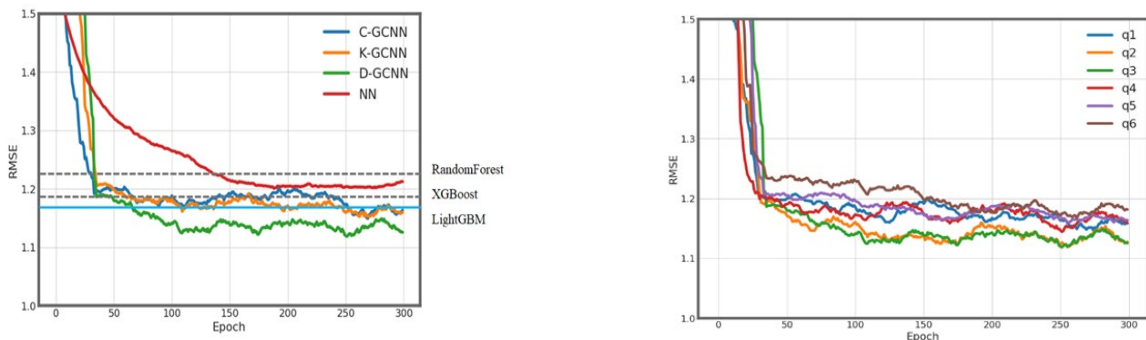


図 3 (左) 走行時間の予測における各手法の精度 ;(右)密度球における密度 Q の値ごとの精度

(2) 量子シミュレーターを用いた畳み込み型量子自己符号化器の開発状況

本研究の結果は、2019 年第 33 回人工知能学会全国大会 (JSAI2019) にて発表した結果である。

自己符号化器とは、出力データが入力データをそのまま再現するように学習する教師あり学習アルゴリズムである。入力層、隠れ層、出力層の 3 層のニューラルネットワークから構成され、隠れ層のデータは入力データの特徴を表すデータと捉えることができる。

量子自己符号化器はニューラルネットワークではなく、最適化アルゴリズムの 1 つである断熱量子計算を用いて計算している。断熱量子計算ではハミルトニアン H の初期状態の設定のために、横磁場 h_x を追加する。また、スピン s_i はパウリ演算子 σ_i^z に相当するため、同じ行列で表される量子ゲートの位相反転演算ゲート Z で表現できる。さらに、時間 t を t_f 規格化したパラメータ $s(=t/t_f)$ を導入し、 $0 \leq s \leq 1$ とする。よって、断熱量子計算におけるハミルトニアンは次のようになる。

$$H = s \left[\sum_{i < j} J_{ij} Z_i Z_j + \sum_i h_{z_i} Z_i \right] + (1 - s) \sum_i h_x X_i \quad (1)$$

量子コンピュータではユニタリ変換を順に行うことで、シュレディンガー方程式の時間発展を表すこと

ができる。前述したように、量子ビット数が限られた量子コンピュータではビッグデータの計算を行うことが困難である。この問題に対処するために、全てのマスと同時に計算するのではなく、図4(左)のように3×3マスの9マスを畳み込みフィルターと考え、元の画像の1マスずつ計算する手法を提案する。各マスは図4(右)のように上下左右の最隣接マスのみ相互作用しているが、元画像から取り出した9マスにおける中心のマスのみ、元画像と同じ最隣接マスからの影響を受ける。よって、元画像の1マスずつ9マスのフィルターで計算し、最後に各フィルターの中央マスを集めることで、元画像における自己符号化器として機能するのではないかと考えた。

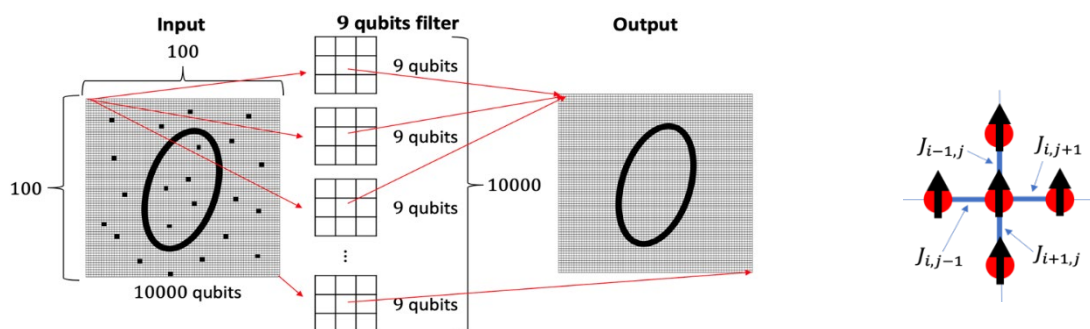


図4 (左)畳み込み量子自己符号化器のイメージ；(右) 結合係数 J の設定例

4×4マスの16マス白黒画像を入力データとし、量子自己符号化器に畳み込みを適用する有効性を検証する。入力画像とノイズ混入後の画像を図5に示す。

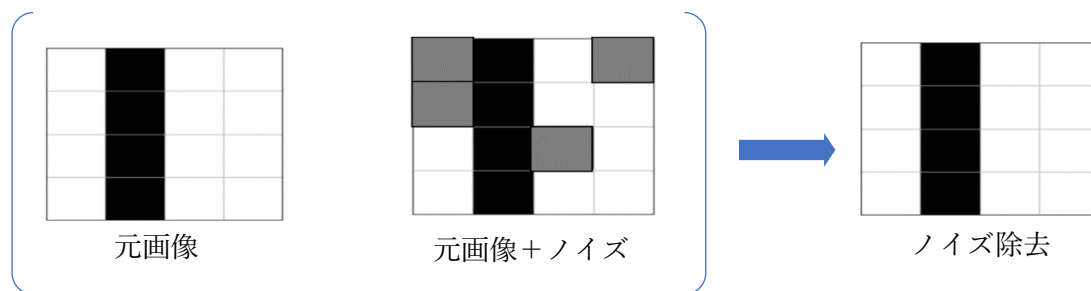


図5 畳み込み量子自己符号化器を用いたノイズ除去例

このノイズ画像において断熱量子計算を用いてノイズ除去を行った結果を図2に示す。また、このノイズ除去を50回試し、16マス画像における畳み込み量子自己符号化器の正確度を検証した結果を図6に示す。図5より、出力データ画像が入力データ画像と同じ画像になっていることがわかる。よって、ノイズ除去ができていると考えられる。また図6より、ノイズ率30%の場合、54%の割合で入力データ画像を完全に復元できることがわかった。量子ビット数が限られた量子コンピュータでのビッグデータの計算手法として、畳み込みの概念を量子計算に適用する手法を提案した。実験の結果、正確度は劣るものの畳み込み量子計算の有効性を見出した。

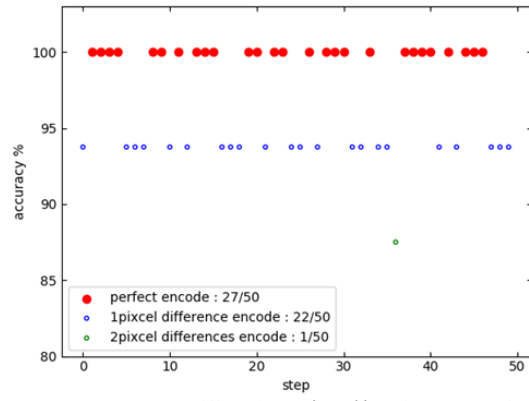


図6 16マス画像の量子自己符号化器の正確度

Ⅲ. 業績・成果一覧

【論文】：

1. R. Suzuki, K. Terada, K. Sakamoto, T. Sogabe and K. Yamaguchi : “ Low Sunlight Concentration Properties of InAs Ultrahigh-Density Quantum-Dot Solar Cells”, Jpn. J. Appl. Phys., 58, (2019) pp.071004 1-7.
2. R. Sugiyama, S. Tatsugi, T. Sogabe and K. Yamaguchi : “Optical Transition and Carrier Relaxation in a Type-II InAs/GaAsSb Quantum Dot Layer”, Jpn. J. Appl. Phys., 58, (2019) pp.012004 1-5.

【学会論文発表】：

国内

1. 戸川匠, 鈴木亮介, 寺田圭佑, 坂本克好, 曾我部東馬, 山口浩一 : 「面内超高密度 InAs 量子ドット層を導入した量子ドット太陽電池の集光特性(2)」, 2019 年 (平成 31 年) 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集 10a-PB3-2 (2019).
2. 曾我部 東馬、斯波 廣大 坂本 克好、山口 浩一 : 「励起子型量子ゲートシミュレーター手法による量子ドット発光解析」(1.電通大 i-PERC、2.電通大 基盤理工、3.(株)グリッド) 2019 年 (平成 31 年) 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会 18p-E216-9(2019)
3. Dinesh Bahadur Malla, Tomoyuki Hioki, Kei Takahashi, Masaru Sogabe, Katsuyoshi Sakamoto, Koichi Yamaguchi, Tomah Sogabe : “Attention-masking extended deep Q network (AME-DQN) reinforcement learning algorithm for combinatory optimization of smart-grid energy”, 2019 年度人工知能学会全国大会 (第 33 回)新潟県新潟市 (朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター) (2019.6.4-7)
4. 高橋 慧, 坂本 克好, 山口 浩一, 沼尻 匠, 曾我部 完, 曾我部 東馬 : 「密度球を用いた Graph CNN 深層学習手法による渋滞予測」, 2019 年度人工知能学会全国大会 (第 33 回) 新潟県新潟市 (朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター) (2019.6.4-7)
5. Tomah Sogabe, Dinesh Bahadur Malla, Tomoyuki Hioki, Kei Takahashi, Masaru Sogabe, Katsuyoshi Sakamoto, Koichi Yamaguchi : “Multi-carrier energy hub management through deep deterministic policy gradient over continuous action space”, 2019 年度人工知能学会全国大会 (第 33 回) 新潟県新潟市 (朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター) (2019.6.4-7)
6. 曾我部 東馬, 斯波 廣大, 坂本 克好, 山口 浩一, Dinesh Bahadur Malla : 「量子コンピューティングにおける最適解の全量子探索」, 2019 年度人工知能学会全国大会 (第 33 回) 新潟県新潟市 (朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター) (2019.6.4-7)
7. 木村 友彰, 渡部 雅也, 坂本 克好, 山口 浩一, Dinesh Bahadur Malla, 曾我部 東馬 : 「汎化ゴールにおける連続動作型ロボットアームの深層強化学習手法の開発」, 2019 年度人工知能学会全国大会 (第 33 回) 新潟県新潟市 (朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター) (2019.6.4-7)
8. 渡部 雅也, 楊 坤, Dinesh Bahadur Malla, 坂本克好, 山口浩一, 曾我部東馬 : 「アルファゼロ型強化学習アルゴリズムを用いた最適制御手法の開発」, 2019 年度人工知能学会全国大会 (第 33 回) 新潟県新潟市 (朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター) (2019.6.4-7)
9. 斯波 廣大, 坂本 克好, 山口 浩一, Dinesh Bahadur Malla, 曾我部 東馬 : 「量子シミュレーターを

用いた畳み込み型量子自己符号化器の開発」, 2019 年度人工知能学会全国大会 (第 33 回) 新潟県新潟市 (朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター) (2019.6.4-7)

国際:

- 1 (Invited) Tomah Sogabe :“Implementing Classical-Quantum Hybrid Machine Learning Algorithms”, The International Workshop on Quantum Computing, Information Processing and Machine Learning (IWQCIPML) December 2-4, 2019. Taipei, Taiwan
- 2 K. Terada, T. Togawa, F. Ozeki, K. Sakamoto, T. Sogabe and K. Yamaguchi : “Sunlight Concentration Properties of InAs/InAsSb Ultrahigh-Density Quantum -Dot Solar Cells”, The 46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, (June 17-21, 2019), Chicago, B8-776.
- 3 H. Ichikawa, S. Yokogawa, Y. Kawakita, K. Sawada, T. Sogabe, A. Minegishi, H. Uehara : “An Approach to Renewable-Energy Dominant Grids via Distributed Electrical Energy Platform for IoT Systems”, IEEE Smart Grid Comm (2019). DOI: 10.1109/SmartGridComm.2019.8909762
- 4 Kei Takahashi, Tomah Sogabe : “Online optimization of AGV transport systems using deep reinforcement learning”, p53-57, NCSS: International Workshop on Networking, Computing, Systems, and Software, p63-68 (November 26-29, 2019),Nagasaki, Japan
- 5 Dinesh Bahadur Malla, Katsuyoshi Sakamoto, Tomah Sogabe : “Multi-agent Based Energy Balancing Management Algorithm for Smart Grid System”, p58-62, NCSS: International Workshop on Networking, Computing, Systems, and Software, p63-68 (November 26-29, 2019),Nagasaki, Japan
- 6 Koudai Shiba, Katsuyoshi Sakamoto, Tomah Sogabe : “Variational Quantum Support Vector Machine based on Deutsch-Jozsa Ranking”, NCSS: International Workshop on Networking, Computing, Systems, and Software, p63-68 (November 26-29, 2019),Nagasaki, Japan
- 7 Tomoaki Kimura, Katsuyoshi Sakamoto, Tomah Sogabe : “Development of Alpha Zero-based Reinforcement Learning Algorithm for Solving Partially Observable Markov Decision Process (POMDP) Problem”, p69-73, NCSS: International Workshop on Networking, Computing, Systems, and Software, p63-68 (November 26-29, 2019),Nagasaki, Japan
- 8 Masaya Watabe, Koudai Shiba, Katsuyoshi Sakamoto, Tomah Sogabe : “Quantum Circuit Learning Using Error Backpropagation”, p74-82, NCSS: International Workshop on Networking, Computing, Systems, and Software, p63-68 (November 26-29, 2019),Nagasaki, Japan

解説論文:

横川 慎二, 市川 晴久, 曾我部 東馬, 澤田 賢治, 早瀬 修二, 大川 富雄:「超スマート社会を支える i-パワーエネルギー・システム」,品質, Vol.49, No.3, pp.28-31(2019).

産学官連携・競争的資金実績：

- 1 NEDO プロジェクト 超高効率・低コスト III-V 化合物太陽電池モジュールの研究開発, 平成 29~平成 32(分担) (平成 30 年度金額：800 万円)
- 2 科研挑戦的研究(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(平成 29~平成 32) (分担)
- 3 共同研究 (株式会社グリッド), 太陽光発電量予測における機械学習に関する基礎研究, 2018/6-2020/1 (代表) (平成 30 年度~令和元年度 金額：1000 万円)
- 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, 2019/4- (代表：曾我部東馬) (代表、継続) (平成 31 年度金額：100 万円)
- 5 共同研究プロジェクト村田機械 (株)：機械学習を用いた半導体搬送システムにおける目的地到着時刻の予測 (2018~2020) (平成 29~令和元年度金額：400 万円)

その他 (招待講演、セミナー等)：

著書：

- 1 曾我部 東馬:「強化学習アルゴリズム入門—「平均」からはじめる基礎と応用」, オーム社 (2019/05)
- 2 曾我部 東馬, 笠原 亮介ら共著:「機械学習を中心とした異常検知技術と応用提案」, 情報機構 (2019/11)

招待講演、セミナー等：

- 1 (株) R&D 支援センター主催のセミナーにて 1 日コース講師を担当。題目:「深層強化学習の基礎とその応用」(2019.4.23)
- 2 情報機構社主催のセミナーにて 1 日コース講師を担当。題目:強化学習入門~基本アルゴリズムから深層強化学習・応用まで (2019.7.9)
- 3 (株) トリケップス社主催のセミナーにて 1 日コース講師を担当。題目:「強化学習アルゴリズム入門:平均からはじめる基礎と応用」(2019.7.23)
- 4 産業技術総合研究所主催のセミナーにて講演を行った。題目:量子機械学習の基礎と応用及び最新動向 (2019.8.20)
- 5 技術情報協会主催のセミナーにて 1 日コース講師を担当。題目:「逆強化学習の基礎、手法選択と応用」(2020.1.20)

2.主要研究成果

2.2 研究

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

I. 2019 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、開発したコントローラホワイトリストは技術研究組合制御システムセキュリティセンター (CSSC) の模擬プラントに実装し、実環境に近い形での動作検証を行った。この際、自律分散型セキュリティ機器の開発のために、コントローラホワイトリスト以外のセキュリティ機器 (ホワイトリストスイッチ、HMI ホワイトリスト) との協調連携機能の実装も行った。

自律分散化されたセキュリティ機器の正当性を検証するためには、遠隔検証を実施しなければならない。そのため、分散エネルギー管理システムの危機を対象に遠隔検証手法を開発した。下記に詳細を示す。

II. 研究実施状況

1. コントローラホワイトリストの自動生成

Ladder Diagram (LD) とプログラム記述の相互変換が可能な Sequential Function Chart (SFC) を利用することで、ホワイトリストを自動生成する手法を開発している。本手法では、SFC 以外で記述された PLC 制御プログラムを SFC へ変換し、SFC からペトリネットを自動生成する(図)。図中において、プレースにトークンがあることを活性化、プレースにトークンがないことを非活性化と記述している。なお、PLC におけるプログラム記述の相互変換は IEC 61131-3 や PLC Open などの技術書を参照されたい。

ベンダ製 PLC の代替としてオープンソースソフトウェアの OpenPLC を利用することで、利益相反や情報開示などの制約を受けることなくセキュリティ技術の開発が可能となった(図)。図中の制御システムは産業用制御システムで利用されないものであるが、通信プロトコルや制御プログラムは産業用制御システムと同種のものとなっている。

また、生成されたコントローラホワイトリストの網羅テスト方法についても開発した(図)。網羅テストとは検査対象の振る舞いや取りうる出力値の組み合わせを取り出すためのシステム入力を求めることである。システム入力を求めるために、ホワイトリストの作成時に利用するペトリネットモデルの状態方程式表現を利用した。状態方程式表現を利用することにより、検査対象の振る舞いや取りうる出力値の組み合わせは状態方程式の可到達集合(状態の取りうる組み合わせ)に帰着することができる。ただし、ペトリネットの状態方程式はシステムの次数に対して状態の取りうる組み合わせの数は膨大(状態爆発)になることがある。この状態爆発を回避するために、PLC プログラムの特徴である周期性(図中では周期入力、ループ)をペトリネットの入力不変性に置き換え、効率的な入力探索方法を枝切り法で実現した。

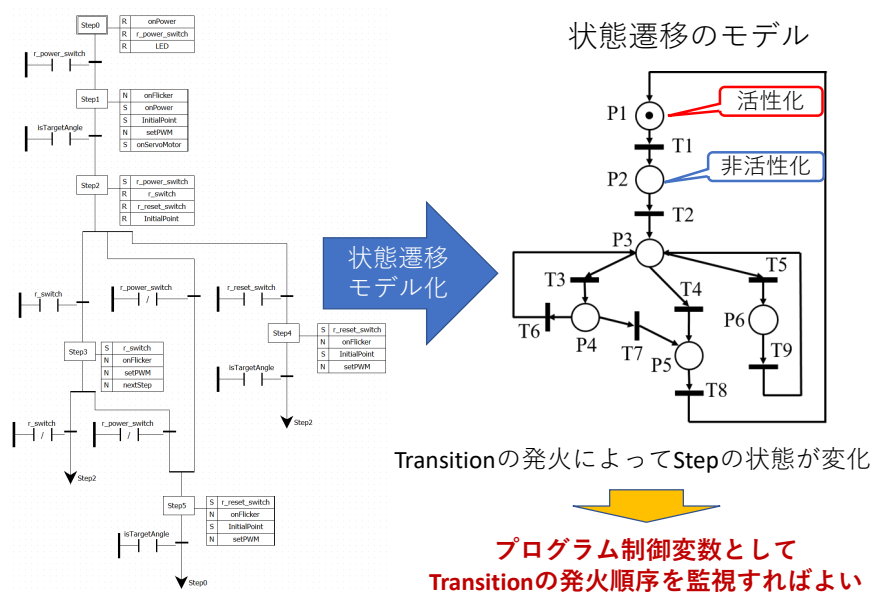


図 1 ホワイトリストの自動生成

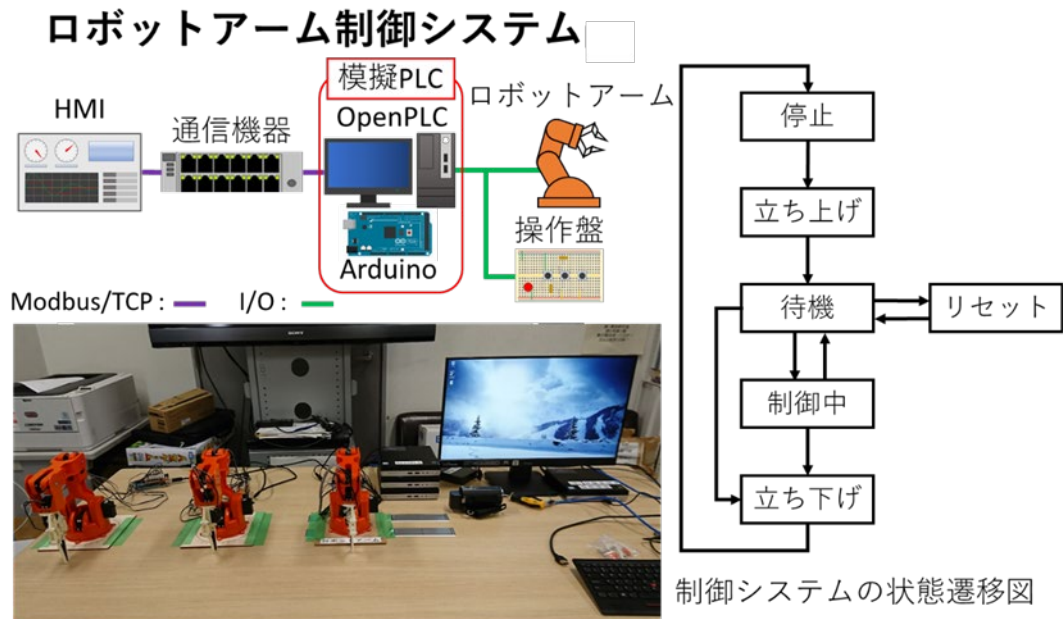


図2 自動生成検査対象

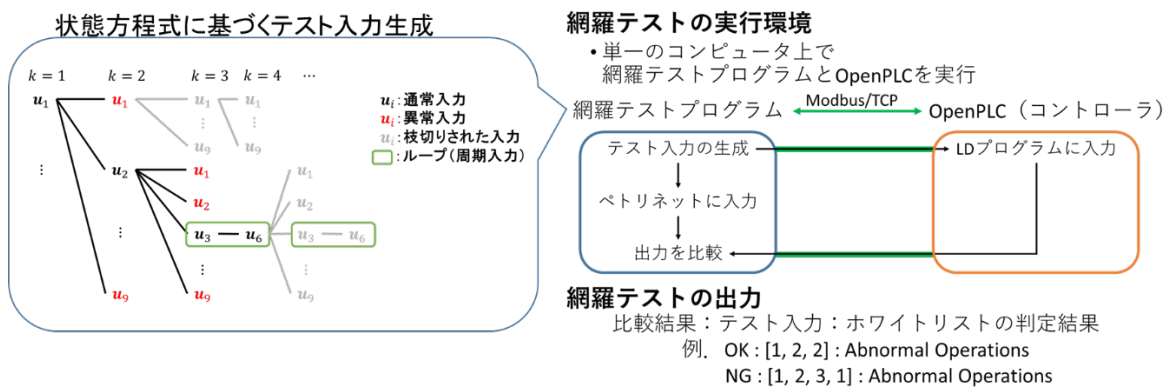


図3 コントローラホワイトリストの網羅テスト

2. コントローラホワイトリストの模擬プラント上での検証

CSSC のガス模擬プラントとビル模擬プラントのコントローラ上で実装した。各模擬プラントの概観を図4に示す。ガス模擬プラントはガスタンクの圧力制御を行う。圧力制御用のPLCにコントローラホワイトリストを実装した。ビル模擬プラントは電気系統と空調系統を制御している。2つの系統の内、PLCで制御を行っている電気系統にコントローラホワイトリストを実装した。本報告書ではガス模擬プラントに絞って報告する。



図4 ガス模擬プラント（左）とビル模擬プラント（右）

2.1. ガス模擬プラントにおける検証項目

ガス模擬プラントにおける検証項目を表から表3に示す。これらの検証項目は、ネットワーク機器、HMI、コントローラの3つのホワイトリストで共通の項目である。

表1 検証シナリオA

No	ストーリー	LC	攻撃元	攻撃先	攻撃内容	攻撃の意図
1	A	制御中	ENG02	PLC	ゲインを-1.0に変更	制御の不安定化
2	A	制御中	ENG02	PLC	流入弁を遮断	供給停止
3	A	制御中	ENG02	PLC	ドレン弁をMAN→開	供給停止
4	A	制御中	ENG02	PLC	目標値を450に変更	不正操作の試み
5	A	制御中	ENG02	PLC	目標値を600に変更	異常な圧力高
6	A	制御中	ENG02	PLC	目標値を10に変更	異常な圧力低
7	A	制御中	OPS04	PLC	ゲインを-1.0に変更	制御の不安定化
8	A	制御中	OPS04	PLC	流入弁を遮断	供給停止
9	A	制御中	OPS04	PLC	ドレン弁をMAN→開	供給停止
10	A	制御中	OPS04	PLC	目標値を450に変更	不正操作の試み
11	A	制御中	OPS04	PLC	目標値を600に変更	異常な圧力高
12	A	制御中	OPS04	PLC	目標値を10に変更	異常な圧力低

表 2 検証シナリオ B

No	ストーリー	LC	攻撃元	攻撃先	攻撃内容	攻撃の意図
1	B	制御中	OPS04	PLC	HH→800	アラーム無効化
2	B	制御中	OPS04	PLC	EH→800	緊急遮断無効化
3	B	制御中	OPS04	PLC	HI→800	アラーム無効化
4	B	制御中	OPS04	PLC	圧力制御→MAN	異常な圧力高
5	B	制御中	OPS04	PLC	バルブ開度→1%	異常な圧力高

表 3 検証シナリオ C

No	ストーリー	LC	攻撃元	攻撃先	攻撃内容	攻撃の意図
1	C	制御中	OPCC	PLC	目標値を 800 に変更	制御の不安定化
2	C	制御中・縮退	OPCC	PLC	目標値を 800 に変更	制御の不安定化

検証項目に対して CSSC と協議しつつ、コントローラホワイトリストの検証シナリオを策定した。まず、コントローラホワイトリストでは攻撃元を区別する必要がないので、検証シナリオ A の 1～6 と 7～12 は等価な項目であるため項目の圧縮ができる。次に、ライフサイクル毎の動作の変化について考える。ゲイン値やアラーム閾値などはライフサイクル毎に値が変化しないのに対して、流入弁やドレン弁の開閉、圧力制御モードの MAN/AUTO などはライフサイクル毎に挙動が変化する。

以上のことを踏まえて選定した検証項目を表 4 から表に示す。流入弁に対しては開放動作の監視、ドレン弁に対しては制御モードの MAN から AUTO への変更動作の監視、タンク内圧力の制御モードに対しては MAN から AUTO への変更動作の監視をそれぞれ追加している。

表 4 検証シナリオ A (コントローラホワイトリスト向け)

No	ストーリー	攻撃内容	PLC-WL (停止中)	PLC-WL (立ち上げ)	PLC-WL (制御中)	PLC-WL (立ち下げ)
1	A	ゲインを-1.0に変更	○	○	○	○
2	A	流入弁を開	○	-※1	-※1	○
3	A	流入弁を閉	-※1	○	○	-※1
4	A	ドレン弁を MAN→開	○	○	○	○
5	A	ドレン弁を AUTO	○	○	-※1	○
6	A	目標値を 450 に変更	-※2	-※2	△※3	-※2
7	A	目標値を 600 に変更	-※2	-※2	○	-※2
8	A	目標値を 10 に変更	-※2	-※2	○	-※2

表 5 検証シナリオ B (コントローラホワイトリスト向け)

No	ストーリー	攻撃内容	PLC-WL (停止中)	PLC-WL (立ち上げ)	PLC-WL (制御中)	PLC-WL (立ち下げ)
1	B	HH→800	○	○	○	○
2	B	EH→800	○	○	○	○
3	B	HI→800	○	○	○	○
4	B	圧力制御→MAN	-※1	-※1	○	-※1
5	B	圧力制御→AUTO	○	-※1	-※1	○
6	B	バルブ開度変更	○	○	○	○

表6 検証シナリオ C (コントローラホワイトリスト向け)

No	ストーリー	LC	攻撃元	攻撃先	攻撃内容	攻撃の意図	PLC 検知
1	C	制御中	OPCC	PLC	目標値を 800 に変更	制御の不安定化	○
2	C	制御中・縮退	OPCC	PLC	目標値を 800 に変更	制御の不安定化	○

※1：コントローラホワイトリストでは正常なコマンドのため検証から除外

※2：圧力制御が MAN 時、目標値は仕様上 PV 値に追従するため検証対象外

※3：圧力目標値の正常範囲の設定によって検知可能（100-500 と 380-420 で検証）

2.2. ホワイトリストの切り替え機能（ガス模擬プラント上での実現）

制御システムの運転状態によって PLC 内プログラムの挙動が異なる。そこで、ライフサイクルに基づいてホワイトリストを切り替えることでより厳密な異常検知を実現する。本節、ライフサイクル毎にホワイトリストを切り替え、切り替え後の各ホワイトリストにおいて正常に異常検知機能が動作することをガス模擬プラントにより検証する。

対象とする制御システムでは、手順書にライフサイクルの切り替えが含まれているのでそれに基づいてホワイトリストの切り替えを行う。手順書の操作により PLC 内の変数として定義されている”プラントライフサイクル状態値”が、表 に示したように変化する。この変数を監視することで、運転状態毎にホワイトリストを切り替える。

表 7 運転状態とプラントライフサイクル状態値の対応表

運転状態	プラントライフサイクル状態値
停止中	0
立ち上げ	1
制御中	3
立ち下げ	2
停止中（縮退運転）	8
立ち上げ（縮退運転）	9
制御中（縮退運転）	11
立ち下げ（縮退運転）	10

プラントライフサイクル状態値によってホワイトリストを切り替えるプログラムでは、まずプラントライフサイクル状態値を取得し、その値により表に示したどの運転状態であるか判定し、適切なホワイトリストを実行している。実行されるホワイトリスト機能のプログラムは、ファンクションコード(FC)にそれぞれ記述されている。ホワイトリストの切り替え機能の検証結果を表8に示す。なお、単体動作とは、模擬プラントに実装する前のコントローラ単体での動作である。LD言語で実装された切り替えプログラムが正しく動作するかの確認のために必要となる。また、○はコントローラの各動作状態でホワイトリストの切り替えが正しく動作したことをあらわす。

表8 ホワイトリスト切り替え機能の検証結果

	切り替え（単体動作）	切り替え（検証結果）
PLC-WL（停止中）	○	○
PLC-WL（立ち上げ）	○	○
PLC-WL（制御中）	○	○
PLC-WL（立ち下げ）	○	○

2.3. 縮退運転機能（ガス模擬プラント上での実現）

CSSCのガス模擬プラントへの縮退運転機能では、フェイルセーフとフェイルソフトを実装している。

フェイルセーフ：制御中以外では安全に停止することを目的とし、フェイルセーフ機能として下記を実現した。

- コントローラホワイトリストによる異常検知後に立ち下げ時の操作を実行する。
- 流入弁を遮断、圧力調整弁の開度指令値を100[%]にすることでガスを抜き安全に停止させる。

フェイルソフト：制御システムは簡単に停止できないため、最低限の機能を維持することを目標とし、下記、フェイルソフト機能を実現した。

- コントローラに表の変数の正常値を予め記録する。
- コントローラホワイトリストによる異常検知後に記録した変数に切り替える。
- 目標値(400[kPa])に追従するように内部制御する。

※表9の変数値を格納するメモリ領域に既定値を縮退運転プログラムで絶えず書き込む。

それぞれの運転状態に対してゲインを-0.1に変更する攻撃を行い、縮退運転動作の検証を行った。表に縮退運転機能の単体動作と検証結果を示す。

表 9 タンク内の圧力制御に関わる変数一覧

変数名
流入流量計 PV 値
流入流量計上限工業レンジ
流入流量計下限工業レンジ
流入流量計 HI アラーム設定値
流入流量計 LO アラーム設定値
圧力計 PV 値
圧力計上限工業レンジ
圧力計下限工業レンジ
圧力計 HI アラーム設定値
圧力計 HH アラーム設定値
圧力計 LO アラーム設定値
圧力計 EH アラーム設定値
圧力計出力値
圧力計設定値
圧力計 PID GAIN
圧力計 PID TI
圧力計 PID TD
ドレン弁開時間(秒)
ドレン弁閉時間(秒)

表10 縮退運転機能の検証結果

	縮退機能（単体動作）	縮退機能（検証結果）
PLC-WL（停止中）	○	○
PLC-WL（立ち上げ）	○	○
PLC-WL（制御中）	○	○
PLC-WL（立ち下げ）	○	○

2.4. 連携機能の開発・実装（ガス模擬プラント上での実現）

ホワイトリストの切り替え機能は協調機能と連携する。協調機能との連携機能は下記となっている。

- i. 協調機能からコントローラホワイトリストの運転状態変更機能
- ii. コントローラホワイトリストの異常検知結果の協調機能への通知及びリセット機能
- iii. 協調機能からコントローラホワイトリストの縮退運転機能の操作機能

i.と ii.の機能については、コントローラホワイトリストのプログラムにおける運転状態、異常検知結果、リセット用フラグを格納する変数を協調機能から読込/書込可能にすることにより実現した。ガス模擬プラントにおける運転状態は表 に示す 8 状態である。協調機能からライフサイクル状態値を 0、1、2、3 の何れかに書換えることで運転状態を変更する。縮退運転機能が動作すると、コントローラホワイトリストが自動でライフサイクル状態値をそれぞれ対応する値 (0→8、1→9、2→10、3→11) に変更する。次に、iii.の機能の実装について説明する。各ホワイトリストの縮退運転は協調機能が集中管理することを考えている。これは、異常検知をした機器とは異なる機器を縮退運転させることでインシデントに柔軟に対応できる利点や、縮退運転が機能する前に確認がしたいという現場の意見を反映させた結果である。そこで、協調機能からコントローラホワイトリストの縮退運転を操作可能なように連携機能の開発を行った。コントローラホワイトリストは運転状態毎にファンクションコード(FC)としてホワイトリストを定義している。

i. ii. iii. の各機能の検証結果をそれぞれ表 11 から表 13 に示す。各機能において、期待する動作が行われたことを検証できた。表 11 において、○は正しく状態遷移が実施されたことを意味する。また、表 11 において、○は各運転状態で通知とリセットが正しく動作したことを意味する。表 1113 において、○は各運転状態で縮退動作が正しく実施されたことを表す。

表 11 i. 運転状態変更機能の検証結果

運転状態の遷移	切り替え（単体動作）	切り替え（検証結果）
停止中 → 立ち上げ	○	○
立ち上げ → 制御中	○	○
制御中 → 立ち下げ	○	○
立ち下げ → 停止中	○	○

表 12 ii. 異常検知結果の通知・リセット機能の検証結果

	通知/リセット（単体動作）	通知/リセット（検証結果）
停止中	○ / ○	○ / ○
立ち上げ	○ / ○	○ / ○
制御中	○ / ○	○ / ○
立ち下げ	○ / ○	○ / ○

表 13 iii. 縮退運転機能の操作機能

	縮退動作
停止中	○
立ち上げ	○
制御中	○
立ち下げ	○

2.5. ガス模擬プラントにおける検証結果

各ホワイトリストにおける異常検知の検証結果を表 から表 16 に示す。シナリオ A の項目 6 の検証内容（△印）については、ホワイトリストに記載する目標値の正常範囲を 100～500 から 380～420 に変更することで検知することができた。そもそも、微小な圧力変化はコントローラ自身が有する外乱抑制機能でカバーできるものであり、制御システムとしての大きなインシデントにはなりにくい。コントローラホワイトリストが IO 情報に基づいて異常検知をする以上、コントローラの本来の制御機能でカバーできるインシデントは制御機能自身で対応するのが妥当である。

結果として、ガス模擬プラントにおいてコントローラホワイトリストが検知すべき範囲に対して検知率は 95.3%となった。

表 14 各ホワイトリストの異常検知結果 (シナリオ A)

No	ストーリー	攻撃内容	PLC-WL (停止中)	PLC-WL (立ち上げ)	PLC-WL (制御中)	PLC-WL (立ち下げ)
1	A	ゲインを-1.0に変更	○	○	○	○
2	A	流入弁を開	○	-	-	○
3	A	流入弁を閉	-	○	○	-
4	A	ドレン弁を MAN→開	○	○	○	○
5	A	ドレン弁を AUTO	○	○	-	○
6	A	目標値を 450 に変更	-	-	△	-
7	A	目標値を 600 に変更	-	-	○	-
8	A	目標値を 10 に変更	-	-	○	-

表 15 各ホワイトリストの異常検知結果 (シナリオ B)

No	ストーリー	攻撃内容	PLC-WL (停止中)	PLC-WL (立ち上げ)	PLC-WL (制御中)	PLC-WL (立ち下げ)
1	B	HH→800	○	○	○	○
2	B	EH→800	○	○	○	○
3	B	HI→800	○	○	○	○
4	B	圧力制御→MAN	-	-	○	-
5	B	圧力制御→AUTO	○	-	-	○
6	B	バルブ開度変更	○	○	○	○

表 16 各ホワイトリストの異常検知結果 (シナリオ C)

No	ストーリー	LC	攻撃元	攻撃先	攻撃内容	攻撃の意図	PLC 検知
1	C	制御中	OPCC	PLC	目標値を 800 に変更	制御の不安定化	○
2	C	制御中・縮退	OPCC	PLC	目標値を 800 に変更	制御の不安定化	○

3. 産業用インターネットオブシングス (Industrial Internet of Things: IIoT) 機器・システムに対する遠隔セキュリティ検証手法の検討

本研究は、就労人口の減少に伴う業務効率化という要請に対し、ネットワーク越しに IIoT の機能を公開する際のセキュリティ確保を目的としている。IIoT 機器・システムのあるべきセキュリティ検証について検討し、実機で検証を実施している。具体的には「(1)検証のための環境の構築」、「(2)検証項目の検討」、「(3)検証の実施」という実施項目について、複数の検証対象に対して、繰り返し実施することにより手法の洗練を行っている。

(1)検証のための環境構築については、評価対象システム(SuC: System under Consideration) と、評価システムの双方について構築した(図)。評価対象システムとしては、分散エネルギー資源(Distributed Energy Resource: DER)の制御を念頭に、IEC 61850 の IED を用いた評価対象の模擬環境を構築した。ま

た、評価用の環境についても、遠隔検証が可能なシステムを構築した。図 5①に示すように、検証機器の Ethernet1 ポートと試験対象の Ethernet ポートを接続し、Ethernet や TCP/IP の不正なデータ形式のを試験データとして送信する。図 5②で示すように、例えば試験対象のデジタル出力(DO)を検証機器の Digital In の入力とし、試験データを受信した結果異変が起きないことをモニタリングする。本研究では、DER の所在地が物理的に分散していることを念頭に、試験対象が遠隔地にあるとした場合を想定する。

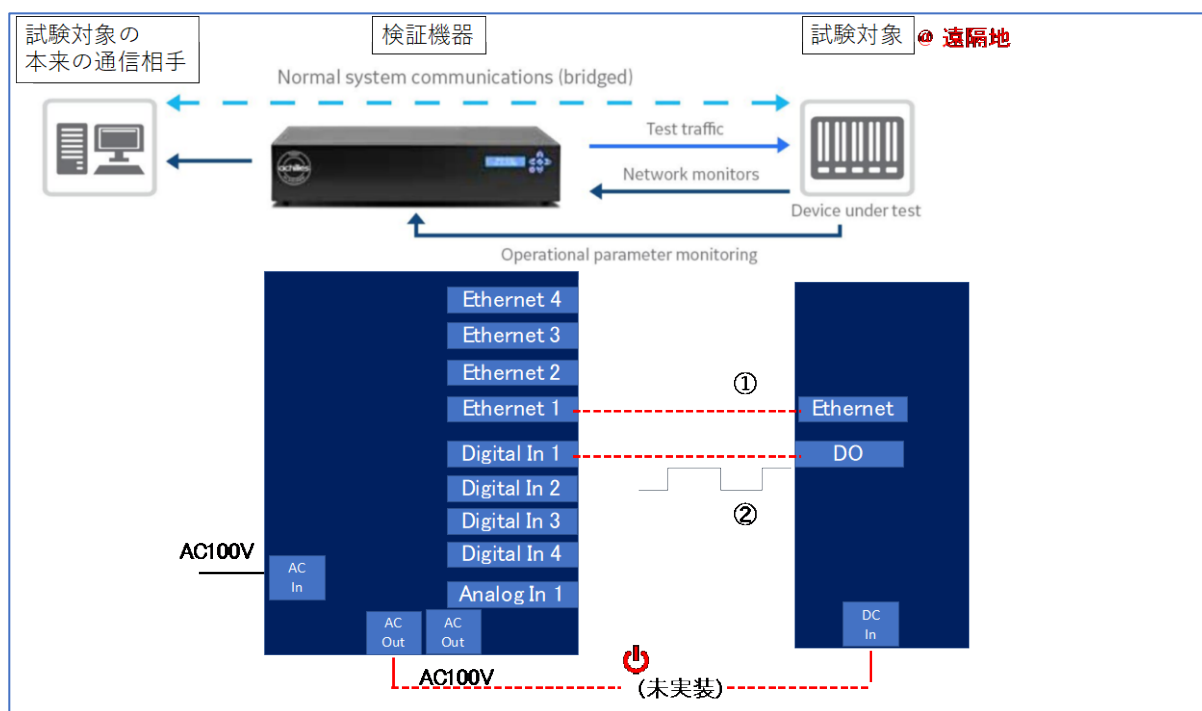


図 5 遠隔セキュリティ検証の構成要素

これに対し本研究では、図 6 に示すように可搬型の小型機器 (Raspberry Pi 4) を SuC の環境に持ち込み試験を実施する方式を採用した。小型機器を携帯電話網(LTE)でインターネットに接続し、検証用の環境と拠点間 VPN 接続をすることで、検証項目の自由度を確保することを実証した。具体的には、配備の容易さから当初 DTLS ベースの VPN により遠隔セキュリティ検証を試行したが、マルチキャスト、ブロードキャストパケットの到達性に問題があった。そのため、L2TPv3 over IPsec により拠点間 VPN を配備することとした。結果として、試験の網羅度を高めることができた。具体的な定量評価については評価対象の妥当性の検討を含め、現在進めている。また、試験の合否を判定するためのモニタリングについてもデジタル出力(DO)信号を TCP/IP に一度変換し、ネットワーク経由で検証機器に入力する方式とした。

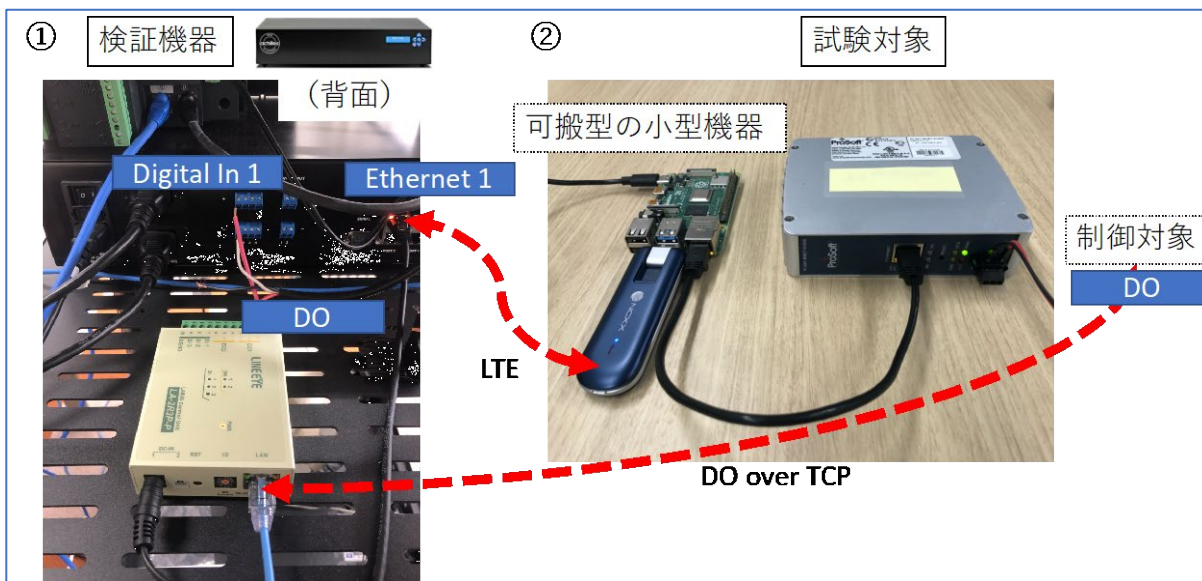


図 6 遠隔検証の実装イメージ

(2)検証項目の検討、については、既存のセキュリティ認証の項目に不足する項目を追加する検討を行い、プロトコルによる差異を吸収する仕組み（メタフロー）を考案した。これには既存の検証機器に含まれる機能では確認できないセキュリティ対策について確認をするために、体系的にシステムに対する試験を実施するようなフローとしている。（国際会議投稿中）

(3)検証の実施、については、構築した環境と検証項目を用いて実際にセキュリティ検証を実施している（図 7）。電力分野以外（鉄道等）のIIoTも含む複数の試験対象について(1)～(3)を反復することで、多様な検証ケースに対応できるように実施している。

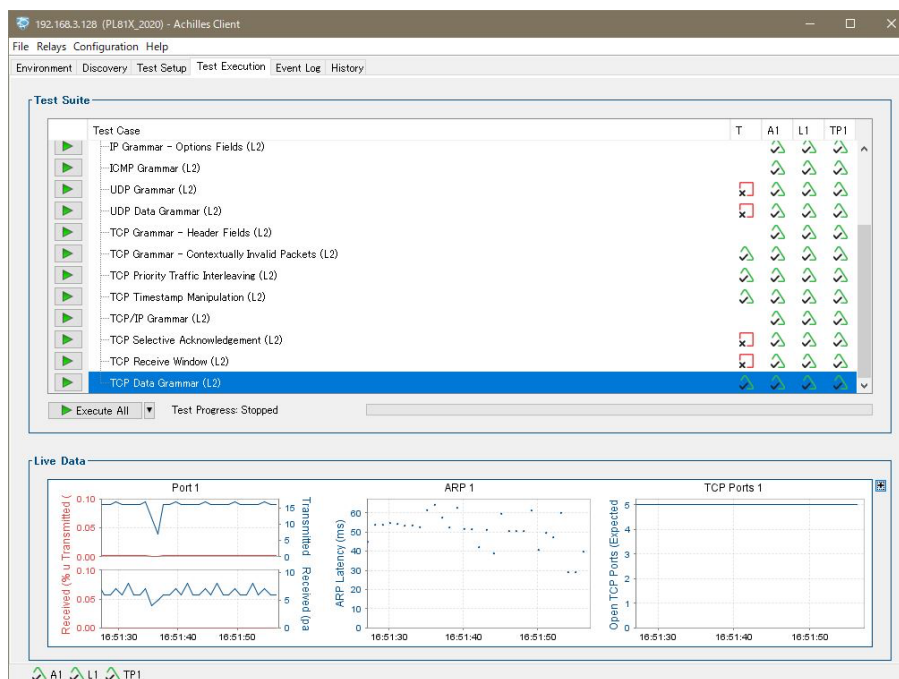


図 7 試験実施状況イメージ (Achilles Testing Platform)

III. 業績・成果一覧

【学術論文】

1. 佐倉衛, 澤田賢治, 金子修, 新誠一, 松田功, 村上徹; “エネルギー保存則に基づく複合物理領域モデルの検証”, 電気学会論文誌 C, 139/ 11, 1293-1303 (2019).
2. 澤田賢治, 濱田吉郎, 福永秀樹, 新誠一; “Generic Transport Model を用いた航空機の縦運動に関わる最悪外乱の一解析”, システム制御情報学会論文集, 139/ 11, 1293-1303 32/ 8, 309-317(2019).
3. 武田健吾, 澤田賢治, 横川慎二, 新誠一; “グラフ列挙による風力・太陽光・蓄電池複合システムの重複グルーピング最適化”, 電気学会論文誌 C, 139/ 7, 786-795 (2019).
4. Yoshiki Nagatani, Kenji Sawada, Seichi Shin; “Self-Triggered Optimal Control Based on Path Search Algorithm”, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 12/ 03, 85-93 (2019).

【学会発表・国内会議】

1. 阪田恒晟, 藤田真太郎, 澤田賢治, 新誠一, 前田一平, 細川 嵩, コントローラに対する第三者監視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, 2019, 2019, 0, 0
2. 松崎和賢, 澤田賢治, 再生可能エネルギーシステムの遠隔制御におけるセキュリティ評価環境の構築, 電気学会電子・情報・システム部門大会, 2019, 2019, 0, 0
3. 佐倉 衛, 澤田賢治, 金子 修, 新誠一, 松田 功, モデルベース開発の為にエネルギー検証自動化, 電気学会電子・情報・システム部門大会, 2019, 2019, 0, 0
4. 福永秀樹, 澤田賢治, 新誠一, 濱田吉郎, 航空機の上下加速度に対する最悪突風の一解析—Generic Transport Model を用いて—, 第 57 回飛行機シンポジウム, 2019, 2019, 0, 0
5. 若狭拓馬, 永谷禎基, 澤田賢治, 新誠一, 車群合流および分離のための切り替え型ピニング制御, 第 62 回自動制御連合講演会, 2019, 2019, 0, 0
6. 佐藤海斗, 藤司純一, 澤田賢治, 市原裕之, 新誠一, クアッドロータの線形化における反復学習的モデル誤差抑制, 第 62 回自動制御連合講演会, 2019, 2019, 0, 0
7. 福永秀樹, 澤田賢治, 新誠一, 濱田吉郎, Generic Transport Model を用いた航空機の上下加速度 に対する有限時間最悪外乱解析, 第 62 回自動制御連合講演会, 2019, 2019, 0, 0
8. 佐倉 衛, 澤田賢治, 金子 修, 新誠一, 松田 功, エネルギー保存則に着目したプラントモデル検証自動化とモデリングガイドライン, システム・情報部門学術講演会 (SSI2019), 2019, 2019, 0, 0
9. 阪田恒晟, 藤田真太郎, 澤田賢治, 新誠一, 前田一平, 細川 嵩, 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 (SSI2019), 2019, 2019, 0, 0
10. 新倉拓也, 澤田賢治, 新誠一, Node-RED におけるアプリケーション開発のための動的プロファイル適用型モデル検証, システム・情報部門学術講演会 (SSI2019), 2019, 2019, 0, 0
11. 松下遥香, 佐藤海斗, 佐倉衛, 澤田賢治, 新誠一, Human-In-the-Loop System によるドライバー個性を反映した自動運転に関する研究, MSCS2020, 2020, 2020, 0, 0
12. 若狭拓馬, 澤田賢治, 新誠一, 切り替え型ピニング制御を用いた複数車群の経路計画と経路追従, MSCS2020, 2020, 2020, 0, 0
13. 福永秀樹, 澤田賢治, 新誠一, 濱田吉郎, 航空機の上下加速度に対する有限時間の最悪外乱と最適入

力,MSCS2020,2020,2020,0,0

【国際会議】

14. Takamitsu Kishida, Kenji Sawada, Seiichi Shin",Control Flow Verification for Program Safety Update,ASCC2019,2019,2019,0,1
15. Kaito Sato, Jun-ichi Toji, Kenji Sawada, Hiroyuki Ichihara, Seiichi Shin",Event Triggered Model Predictive Control for Descending Drone,SICE Annual Conference,2019,2019,0,1
16. Takuya Niikura, Kenji Sawada, Seiichi Shin",Dynamic Profile Modeling for Node Connectivity Verification on Node-RED,SICE Annual Conference,2019,2019,0,1
17. Ryota Hasegawa, Kenji Sawada, Kosuke Hata, Shintaro Fujita, Seiichi Shin",On the Driving State Separation and Estimation of Industrial Control System Using Machine Learnin,SICE Annual Conference,2019,2019,0,1
18. Kenji Sawada, Shu Hosokawa",Control System Security Training and Education in UEC,SICE Annual Conference,2019,2019,0,1
19. Mamoru Sakura, Kenji Sawada, Seiichi Shin, Osamau Kaneko, Isao Matsuda",The Energy-Based Auto-Verification focused on Hierarchical Model Structure for Model Based Development,IECON2019,2019,2019,0,1
20. Kousei Sakata, Shintaro Fujita, Kenji Sawada, Seiichi Shin, Shu Hosokawa, Ippei Maeta",On the implementation of multiple anomaly detection functions to a third-party monitoring system for secured control,SII2020,2020,2020,0,1
21. Takuma Wakasa, Yoshiki Nagatani, Kenji Sawada, Seiichi Shin",Switched Pinning Control for Vehicle Platoons via Mixed Logical Dynamical System Modeling,SII2020,2020,2020,0,1
22. Takuya Niikura, Kenji Sawada and Seiichi Shin",On the Profile Verification of IoT Application on Node-RED,AROB2020,2020,2020,0,1
23. Mamoru Sakura, Kenji Sawada, Seiichi Shin, Osamu Kaneko, Isao Matsuda",Modeling guideline for the energy-based auto-verification,AROB2020,2020,2020,0,1

2.主要研究成果

2.3 エネルギーインフラのシステムレジリエンス確保に向けた研究

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

2.3.1 エネルギーインフラのシステムレジリエンス確保に向けた研究

本研究は、iPERC の統括研究・開発プロジェクトの一つとして、自律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。以下に示す3つの課題について研究を推進してきた。

- ① システムにおける創発的不具合の現状把握と、システムレジリエンスを評価する手法の確立。
- 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 システムにおいてエネルギー効率化と高信頼化を実現するためのデバイス信頼度を評価する統計手法の開発。

以下に、これらの詳細を示す。なお、本研究は科研費挑戦的研究（開拓）17H06293（代表）、科研費・基盤研究(A)15H01786（分担）の支援を受けている。

2.3.1.1 創発性不具合の現状把握およびシステムレジリエンス評価手法の研究

社会インフラシステムのレジリエンス（回復力、堅牢性）を評価、付与するための基礎概念の確立と評価指標の構築を目標とし、社会インフラ事故の事例分析研究を実施する。この結果に基づいて、i-パワーエネルギー・システムに対してレジリエンスを付与し、アベイラビリティを確保するのみでなく、ユーザーに信頼、安心を担保するための構造、要素を設計する指針を明らかにすることを目的としている。

令和元年度は、前年度までに検討した機能共鳴分析法 FRAM による創発的不具合のグラフ表現に基づいて、これをベイジアンネットワークに写像し、創発的不具合を定量的に評価、予測する方法について検討した。

多数の機能の連携によって動作する複雑なシステムにおいては、単独では正常な構成要素でも、それらの間に相互作用が発生し故障に至る創発故障（田中, 2014）と呼ばれる不具合が課題となる。この創発的不具合を可視化して表現する方法として、機能共鳴解析手法（Functional Resonance Analysis Method: FRAM）（Hollnagel et al., 2012）の応用が提案されている（横川, 2019）。ところが、FRAM には FTA における故障確率や FMEA における RPN のように、定量的にリスク評価する指標がない。先行研究（荒関, 2018）では FRAM モデルをベイジアンネットワーク(Bayesian Network: BN)に置き換え、BN の条件付確率表(Conditional Probability Table: CPT)から機能共鳴の発生を評価することが提案されている。一方で、CPT を決定する具体例方法は明確でない。

そこで、創発的不具合の可能性を定量的に評価する手法の提案を行った。具体の事例として燃料電池自動車のリコール不具合の事例（図 1.1-1）を挙げ、FRAM を用いた創発的不具合の構造表現（横川, 2019）に対して相対的な定量挙動の指標を導入した。その際、Leveson らが提唱した STPA (STAMP based Process Analysis)（Leveson, 2012）にて故障モードを分類することにより CPT を決定し、各機能の CPT の変化に伴う走行機能の正常確信度の変動を相対的に比較することによって、創発的不具合の評価可能性を検討した。

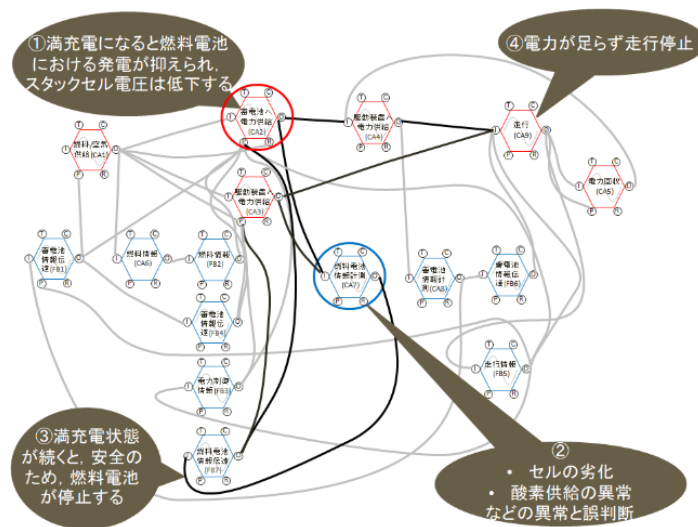


図 2.3-1, 燃料電池自動車のリコール不具合の FRAM 表現の例.

検討の結果、対象事例は提案指標によって創発的不具合の誘起が示唆される組み合わせであることがわかった。一方で、確信度の伝搬は、ネットワークワークの形状に強く依存する可能性がある。今回、創発的不具合検出に用いた走行確信度の比が、ネットワークの形状に依存しているのか否かの検証、及びその対策が今後の課題である。

2.3.2 機械学習・深層学習を用いたエネルギー設備のしんだん・劣化予測に関する研究

i-パワードエネルギー・システムにおいては、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。この基盤技術としての予測を機械学習・深層学習を用いて実施している。

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バーチャルグリッドでは、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 (尾久ら, 2013)。ところが、DC 給電である USB PD に存在しない特徴を用いるため適用が難しい。一方で、バーチャルグリッド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。

そこで、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を示す。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

別する手法の提案を行った。

分類手法の比較のため、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(図 2.3-2)を行った。

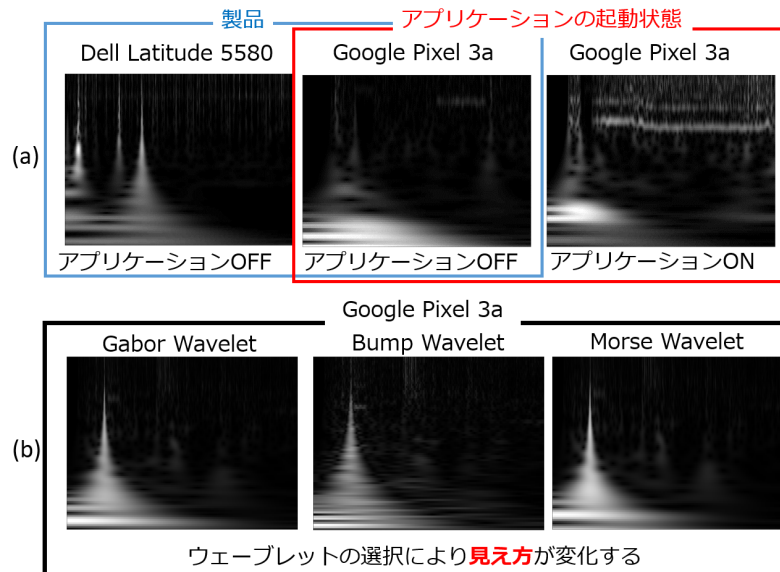


図 2.3-2, 受給電波形のスカログラムの比較.

製品分類手法は LSTM を用いた分類、同一製品の特定の機体分類手法は CWT と CNN を組み合わせた分類のみが、分類精度 90%を超える。このことから、大きく異なる受給電波形の分類には LSTM、機体毎のように受給電波形に僅かな差異のみ存在する場合には、CWT と CNN を用いた分類が有効と考えられる。すなわち、製品毎の受給電波形には、大局的な波形の差異を認識可能な LSTM が有効である。逆に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。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。一方、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と推察される。

今後、これらの機械学習手法によるデバイスの状態推定を蓄電池の診断などに展開し、協調給電による自律分散型グリッドのレジリエント確保に貢献することを目指す。

一方で、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。その際、知識主導の制御ポリシーを確立するには、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ことが知られている。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(阿部ら, 2012)。一方で、フィールドでの劣化を分析した結果、2種類の劣化には交互作用的な効果があることも確認、報告されている(遠藤, 2019)。また、最終的なサイクル数と累積休止時間が同じであっても、休止時間とサイクル数の進行の差(経路差)によって観測される劣化量が異なる現象も報告されている(横川, 2017)。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。この電気化学インピーダンス測定を試験後のサンプルに適用することにより、経路差に関する内部状態変化を評価することが期待される。そこで、経路差が大きく異なる充放電試験を行い、容量劣化に関する統計解析を行った。同時に、試験後サンプルに電気化学インピーダンス法を用いた LiB の内部状態の分析を行い、容量劣化メカニズムへの経路差の影響を検討した(図 2.3-3)。

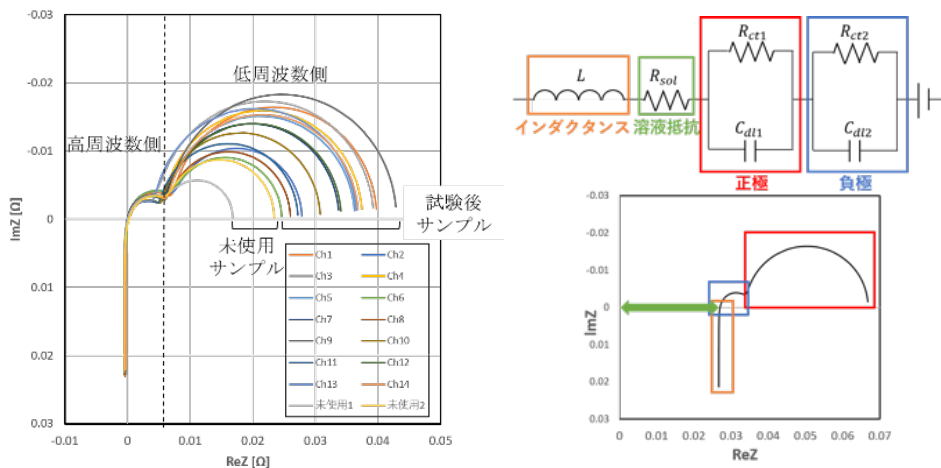


図 2.3-3, 左) 試験後サンプルと未試験サンプルのナイキスト線図. 右) 等価回路.

インピーダンスの測定結果に基づく等価回路の特性値シミュレーションより、LiB の劣化は正極の電荷移動抵抗の増加に依存していることが示唆される結果が得られた。また、この内部状態の変化による容量劣化は、使用条件に関する経路差の影響を受けないものとも考えられる。一方で、SOD の初期値、変化の割合に対する個体間差は、液抵抗などの劣化に起因することが推測される結果となった。これらの診断を短期間に行うことができれば、グリッドに接続された蓄電池の能力に関する推測を行うことが可能になると考えられる。今後、劣化シミュレーションの開発と診断方法の両者について検討を進める。

2.3.3. 半導体デバイスの超長期信頼化に関する研究

再生利用エネルギーの利用効率向上を加速する AC/DC コンバータや、デジタルデータの長期保管のためのデータセンターの低消費電力運用には、先端パワーデバイスやストレージデバイスなどの技術が鍵となる。また、i-パワーエネルギー・システムにおいても、それらのデバイスは重要な位置を占める要素となり、その信頼性向上技術の重要性は高い。

莫大なデータを長期に保管することを目的とする大容量ストレージデバイスでは、低消費電力と超長期信頼性が重要な要求特性となる。あらゆるものがインターネットに接続し、データがクラウドに保管されるようになれば、その記憶容量は膨大になると同時に、その保管や検索のためのエネルギーも膨大なものになる。さらに、サーバー、ストレージのいずれも系統から電力を供給されて動作するが、現在のシリコン基板を用いたパワーデバイスによる AC/DC 変換、および DC/DC 変換では、熱として損なわれるエネルギー量も大きい。

例えばデータセンターにおける電力消費は、その約 45%が冷却用設備によるものであるが、設置された IT 機器が消費する電力も、約 30%を占める。その内訳は図 2.3-4 のようになり、例えば AC/DC 変換ロスを削減するだけでも大きな効果が期待されると同時に、発熱量の低下によって、冷却用のエネルギー消費にも軽減効果がある。

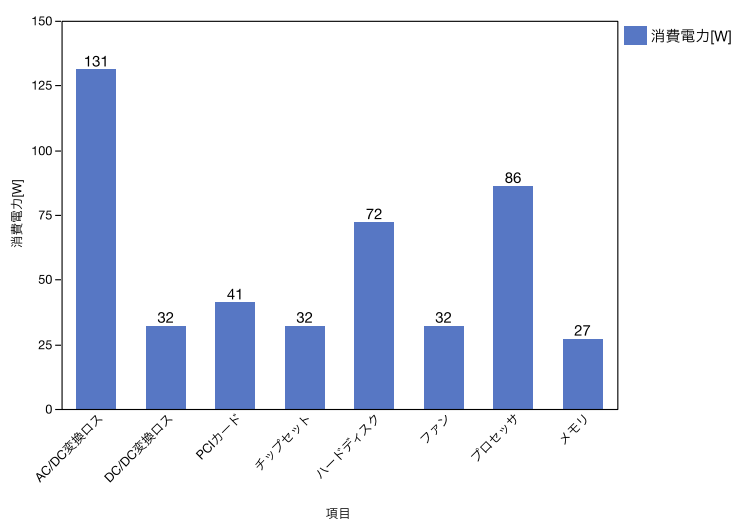


図 2.3-4, サーバー内の消費電力.

現在, SiC (炭化ケイ素), GaN (窒化ガリウム) などの先端パワーデバイスの開発と信頼性向上が広く取り組まれている。これらのデバイスを使用した電源システムには、大幅な消費電力の低下が期待されている。また、駆動部品を有する HDD に対してフラッシュメモリをストレージデバイスとして採用することも検討されている。これらのデバイスの実用化の鍵の一つは、十分な信頼性を確保することにある。中でも、半導体チップの内部、パッケージ内部、基盤接続とのインターフェイスなどに用いられる配線の信頼性を確保することは、最も困難かつ重要な課題の一つである。誤り訂正回路や抵抗変化メモリの技術の併用により、フラッシュメモリそのものの長期信頼性は、現在すでに達成している信頼性をベースにして設計の視点から検討しうるのに対し、シリコンと外部の信号通信を担う配線は、従来の 10 倍以上の耐湿・耐保管信頼性を確保する必要がある (Yokogawa and Kunii, 2018)。

さらに、回路規模が増大した先端メモリデバイスや、結晶欠陥によって特性や信頼性に影響を受ける先端パワーデバイスにおいては、欠陥密度の分布を前提とした寿命分布解析が必要になる。これに対して当研究室では、欠陥分布の影響を形状パラメータの一つで表現する三母数寿命分布の応用を提案し、各種の分析手法などを開発、評価してきた (Yokogawa, 2017)。また、試験規模の軽減を実現するためのサドンデス試験法の適用と、加速試験のための加速モデルを導入する方法について提案し、配線層間へ混載した DRAM 容量素子の TDDDB 試験結果への適用により実証し、有効性を示した (Tate and Yokogawa, 2018)。また、生産品質における欠陥密度が異なる母集団の混合と、複数故障モードの競合の両者を、同

一故障メカニズムを前提として説明する寿命分布モデルを提案し、国際会議にて報告した (Yokogawa and Tate, 2018).

図 2.3-5 はスマートフォンなどのモバイル機器と、自動車分野で採用される先端半導体デバイスについて、近年の製造技術の推移を示したものである。図中の数字は製造プロセスの加工寸法を示している。従来大きかった両者の差は、近年ほぼなくなりつつある。すなわち、モバイル機器などで量産が開始され、初期故障の要因となるプロセス欠陥が排除された後に自動車分野に採用されることが一般であったのに対し、自動運転などの高度な制御が必要になるにつれて、同程度の高機能が必要とされるようになったためと考えられる。

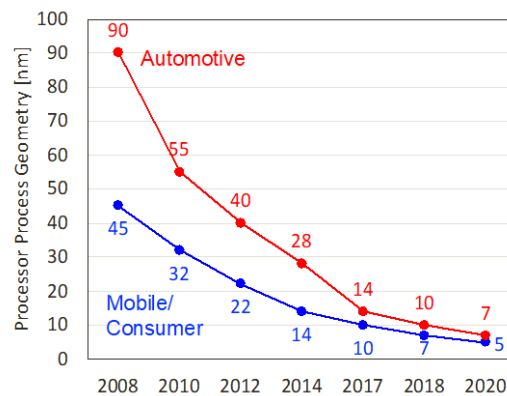


図 2.3-5, 車載用デバイスとモバイル用デバイスの加工プロセスの変遷。

このような状況のもとでは、プロセス欠陥に起因する初期故障と、採用された材料やプロセスの真性寿命で決まる摩耗故障の両者を、技術開発の段階で早期に見極める必要がある。特に、回路規模が大きくなる先端デバイスにおいては、製造ばらつきの影響や、チップ内のストレス分布の影響を考慮して、信頼度の評価や予測を精緻に行うことが求められる。

令和元年には、形状パラメータを2つ有する三母数の分布関数を用いて、先端デバイスの寿命分布評価を行った事例とその効果についての検討を進め、二つの応用事例に関する寿命分布の応用と、ベイズ推論の導入に関する研究を進めた。これらの成果を Progress review としてまとめて投稿し掲載に至った (Yokogawa, 2020. 4.1 採録済)。

半導体デバイスを高集積化するための微細化技術の進行は、一方で製造のばらつきが欠陥密度を不均一化させ、寿命のばらつきが増大するとともに分布形状が複雑になるという課題を生じさせている。これは配線やトランジスタなどのセグメントの形状において、加工寸法に対する均一性を確保することが困難になるためである。例えば、先端プロセスではエッチング加工の Line-edge Roughness (LER)、リソグラフィのアライメントのずれ、Via 径やコンタクト径のばらつきにより、配線-Via 間やゲート-コンタクト間の絶縁膜の膜厚に不均一性が生じる。

この不均一性により、観測される寿命分布がワイブル分布に従わず、ワイブル確率紙法におけるプロットが、直線に乗らない事象が数多く報告されるようになった。例として、経時絶縁膜破壊 (Time-dependent Dielectric Breakdown; TDDB) の寿命特性などが挙げられる。同一ウェハ上において欠陥密度が不均一な連続分布となるため、このウェハから採取したサンプルの試験結果をワイブル確率紙にプロットすると、データが上に凸の形に並ぶことが数多く報告されている (Wu, et al., 2013, Yokogawa, 2015, and Shimizu et al., 2016)。

これに対し、二つの形状パラメータを有する一般化ブル分布タイプ XII (GBXII)を用いた解析が近年注目されている。GBXII の分布関数を式(1)に示す。

$$F(t) = 1 - \left[1 + \frac{1}{\alpha} \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right]^{-\alpha}, \quad (1)$$

ここで、 α は欠陥密度分布に対応して分布の形状を決定する形状パラメータ、 β は欠陥密度が均一な場合の真性寿命分布に対応する形状パラメータ、 η は尺度パラメータである。TDDB を観測した寿命データについて、従来のワイブルプロットでは上に凸になる分布をよく説明することができる。特に、形状パラメータ α はクラスタリングパラメータと呼ばれ、セグメントの一樣性の影響度合いを示す意味がある。

LSI の微細化を実現させるために採用された W-Plug コンタクトは、その完成度の高さから複数世代において、同じ技術が改良されながら採用されている。その完成度は高いものであるが、微細化の進展に伴ってコンタクト抵抗の寄生抵抗に占める割合が増加していることや、そのばらつきが問題となった。信頼性の観点からは、ゲートとコンタクトのスペースにかかる電界による TDDB が問題となっている。

W-Plug コンタクトの絶縁破壊に関する最初の報告は、2006 年の International Reliability Physics Symposium で、Nokia 社から報告されたものである (Muroke, 2006)。故障解析レポートから作成された、浮遊ゲート型セルを基本セグメントとするフラッシュメモリの市場故障の分類結果より、金属配線、ゲート Poly-Si などの配線間リーク不良が全体の 62%を占めることが示された。これは、書き込みなどの動作の際に比較的高い電圧を要することと、高密度化のために他のデバイスよりも進んで微細化を採用するというフラッシュメモリの要求特性が、その背景にある。また、それらのリーク不良の中でも、最も発生数の大きいものがドレインコンタクトと 2nd Poly-Si (コントロールゲート) 間のリークであり、全体の 31%を占める。いいかえれば、浮遊ゲート型セルによるフラッシュメモリでは、最も市場故障のポテンシャルが高いものである。浮遊ゲート型セルでは、ゲートが積層構造となり、通常 MOS トランジスタと比較してトータルのゲートの高さが高くなる。この状況で集積度を上げるための微細化を進めるため、コンタクト径のばらつきやリソグラフィの目合わせズレによってスペースが狭くなり、リーク不良を起こすポテンシャルが高くなる。

ゲート-コンタクト間の TDDB 現象は MOL-TDDB (MOL: Middle of Line) と呼ばれ、定電圧 TDDB 試験によって、リーク電流の経時破壊特性を示すことが報告されている (Yokogawa, et al., 2011)。特に、試験開始直後の初期リーク電流が高いものほど寿命が短い傾向があり、スペースばらつきがその要因であることが推測される。

このように、出来栄の影響を強く受けた寿命分布に対して、GBXII の 2つの形状パラメータは製造ばらつきの影響と、本質的な物理特性としての寿命ばらつきを分離して評価することができる。GBXII は α が無限大となるとワイブル分布に一致する。このワイブル分布の形状パラメータが β に一致する。 α の推定値が小さいときにはセグメントの均一性が欠如した状態にあると考えられる。また、分布の左裾の形状、いいかえれば低い累積故障側のみを取り上げたプロットは直線状となり、この傾きが β に一致する。これらの特徴を応用して、抵抗変化型メモリの電気抵抗特性の評価に GBXII を適用し、 α の点推定値より金属酸化物中の電導経路と結晶構造の関係を評価するなどの試みも報告されている。

いうまでもなく、GBXII は通常のワイブル確率紙でパラメータ推定を行うことが出来ない。そのため、パラメータ推定には最尤法などの手段を用いる必要がある。一方で、分析における外れ値の影響や層別の必要性を直感的に判断するためには、グラフィックな方法を併用する要求も高い。そこで、ワイブル確

率紙の代替えとなる簡便な確率紙法が 2step 確率紙法として提案した (Yokogawa, 2015). これは, 第 1 ステップとして欠陥密度の不均一性による分布形状の変化を表現する α の推定を行い, 第 2 ステップとして寿命に至る固有のメカニズムに起因する形状パラメータ β と, 分布の尺度パラメータ η を推定する, 2 段階の方法である. この 2step 法は, ワイブル確率紙と同様に, 統計学の深い知識がなくても観測データから容易にパラメータを推定でき, その結果がグラフィカルに表現されるため直感的に理解しやすいというメリットがある.

一方で, GBXII を用いた寿命分布評価には 2 つの課題がある. 1 つはクラスタリングパラメータ α の推定精度を高めるために観測データを増やさなければならないため, 信頼性試験のコストが増加してしまうことである. さらにもう 1 つは, クラスタリングパラメータ α が真の値より小さく推定された場合に形状パラメータ β が真の値より大きく推定されてしまう, 形状パラメータ間のトレードオフの問題が生じることである.

これらの課題への対処としては, サドンデス試験法を応用したテスト構造の設計による回避 (Tate and Yokogawa, 2018) や, 従来情報に基づくパラメータの事前分布を仮定したベイズ推定などの工夫が有効である (Kunii and Yokogawa, 2019). 今後は様々な事象に対する適用例の検討を通じて, クラスタリングパラメータ α と, 具体的なプロセスばらつきの相関構造の検証に関する研究などが期待される.

一方で, 莫大な数のセグメントで形成されている半導体デバイスにおいては, 回路毎の機能や動作条件に対応した動作ストレスがセグメント毎に生じる. すなわち, ストレスそのものが分布を持つことになる. 実際のチップレベルの配線寿命は, このストレス分布のもとで駆動する回路において, 最も短い時間で発生する断線によって決まる, 競合リスクモデルで表現される. チップ内に配線が k 本存在し, それがリスク C_1, \dots, C_k で表されるとする. リスク C_i が単体で作用したときの故障までの時間を X_i とすると, k 個のリスクが同時に作用したときのチップの故障に至る時間 T_i は

$$T_i = \min(X_1, \dots, X_k)$$

で表される. 一般にはリスクは互いに独立と考えられるが, 電流密度依存性を持つこと, 配線の形状 (特に長さ) にも影響されることが知られており, この分布の影響を考慮することが必要となる.

チップ内配線の電流密度分布を調査した例 (Gall, et al., 2007) では, 設計基準として設定されている最大電流密度 j_{\max} で規格化した電流密度について, 低い電流密度の配線の数も多く, 最大電流密度近くの高い電流密度の配線は数少ないことが報告されている. この分布の傾向はおおよそべき乗則に従っており, いわゆる Zipf の法則が成り立つと考えられる. このような電流が流れる配線内では, 金属原子核が原子流と衝突することによって運動量交換が生じる. これを駆動力とした原子輸送と, それによるボイドの成長が, エレクトロマイグレーション現象である.

ボイドの成長によって, 回路駆動に影響を及ぼす配線抵抗増加に至るまでの時間が寿命にあたる. すなわち, その寿命のストレス依存性および分布形は, エレクトロマイグレーションの物理メカニズムに強く依存するものとなる. まず, 寿命 t_f の電流密度 j , および寸法の依存性は以下の式 (3) によって示される (Oates and Lin, 2009).

$$t_f = HLdw/A(j - j_c) \quad (3)$$

ここで, H は配線の高さ, L は配線長, d は配線を形成する金属の結晶粒径, w は配線幅, j_c は応力勾配に起因する逆流の作用によってボイドの成長が抑制される電流密度の閾値を示す. 式 (3) に示される依存性に従って, 平均的な寿命が変化することが示される.

また、エレクトロマイグレーションの寿命分布は、対数正規分布によく従うことが知られている。これは、比例効果モデルによって説明される。原子輸送によって配線中にボイドが形成されると、断面積の低下によって局所的な電流密度の増加とジュール熱による温度上昇が生じる。この二つの現象によって原子輸送速度が局所的に加速される。これによってボイドの成長も加速され、さらに断面積も低下することになる。この正帰還をよく説明するのが比例効果モデルである。材料や部品の中に含まれるクラックの大きさや、不純物、空隙の数などが次第に増大するという場合、初期の大きさを x_0 、 i 番目のステップでの変化量増分を $x_i - x_{i-1}$ として、これが直前のステップでの大きさに比例するとする。すなわち、

$$x_i - x_{i-1} = \delta_i \cdot x_{i-1} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

となる。ここで δ_i は互いに独立な正のランダム変数である。上式は以下のように変換できる。

$$x_n = x_0 \prod_{i=1}^n (1 + \delta_i)$$

すなわち、 x_n に対数をとると独立したランダムな変数の和となり、中心極限定理より極限で正規分布に従うと考えられる。従って、 x_n の分布は対数正規分布となる。エレクトロマイグレーションによるボイドの成長の正帰還も、前述のようにこの挙動に従うと考えられるため、ボイド成長が断線に至るに要する時間、すなわち寿命も対数正規分布すると考えて不自然ではないと考えられている。

以上より、平均的な挙動が式(3)にて説明される対数正規分布を考慮し、その競合リスクモデルによってチップレベルの寿命分布が決定されるものと考えられる。このとき、膨大な数の配線寿命の最小値によって決まることから、ワイブル分布と考えるのが妥当という見解がある。ところが、対数正規分布に従う均一なセグメントの競合リスク分布は、ワイブル分布への収束が非常に遅く、100万個程度の競合でもワイブル分布に従うとは言い難いことが、モンテカルロシミュレーションで確認した (Yokogawa and Tate, 2019)。特に、デバイスの信頼性として議論の対象となる、1 ppm レベルの累積故障確率にあたる分布の裾の領域では乖離が大きい。

そこで、ワイブル分布および対数正規分布の両者を特殊ケースとして包含する一般化ガンマ分布 (GENG) を、エレクトロマイグレーションに関するチップレベル寿命分布として用いることが提案した。GENG の確率密度関数は式(4)で与えられる。

$$f(t; \kappa, \beta, \eta) = \frac{\beta}{\Gamma(\kappa)\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\kappa\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (4)$$

ここで、 $\kappa = 1$ のとき、式(4)はワイブル分布に一致する。また $\kappa \rightarrow \infty$ にともない、GENG に従う変数を対数変換したものは、平均が $\ln(\eta) + \ln(\kappa)/\beta$ 、標準偏差が $1/(\beta\sqrt{\kappa})$ の正規分布に近づく。図 2.3-6 は、セグメントとしての配線の寿命分布に対数正規分布を仮定し、Gall の電流密度分布に対応するチップレベルの寿命分布を、モンテカルロシミュレーションにて検証した結果である。累積故障確率 10%以下の領域では、GENG の当てはまりが、ワイブル分布や対数正規分布よりも優れることがわかる。

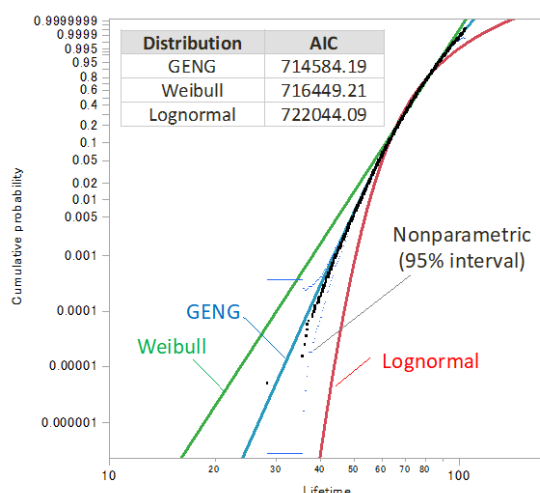


図 2.3-6, モンテカルロシミュレーションによるチップレベルの寿命分布の例.

そこで、チップ内電流密度分布にジップ分布を、セグメントの寿命分布に対数正規分布を仮定したとき、それぞれの情報から GENG のパラメータを推定することを可能にするため、モンテカルロシミュレーションによってパラメータ間の関係を調査した。すなわち、設計情報としての電流密度分布を示すジップ分布と、信頼性試験で確認されるセグメントの対数正規分布から、実現するチップレベルの寿命分布パラメータを推測することが可能となる。図 2.3-7 に、Wheat-stone bridge 構造を応用してチップレベル寿命分布を観測した結果 (Gall, 2001) と、提案した推定法の比較を示す。セグメントの対数正規分布に基づいて GENG を推定した結果は、観測結果とよく一致することがわかる。

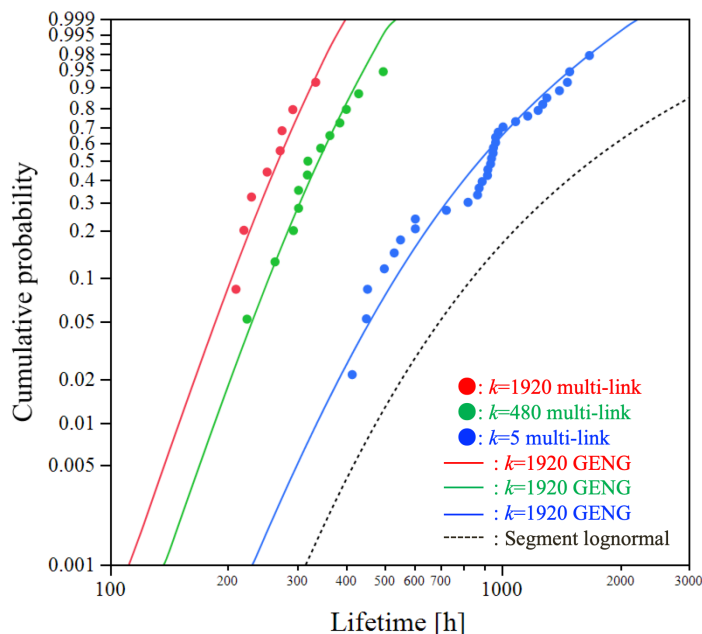


図 2.3-7, WSB 法によるチップレベルの寿命分布の観測結果と推定法の比較.

ばらつきの制御が課題となる先端デバイスにおいては、クラスター化された欠陥分布や、セグメント毎のストレス分布を考慮し、適切な分布関数を用いて信頼度を評価する必要がある。特に、それらの影響を説明する形状パラメータを有する三母数分布関数の適用が有用である。今後の応用研究として、企業と

の共同研究を推進する。

さらには、市場で観測される故障データに関する Warranty data analysis の手法について、電子情報技術産業協会 (JEITA) などの団体において普及、啓蒙する活動を開始した。これらの活動を通じて、2050年のゼロエミッション社会を実現するにあたって、我が国の半導体産業のプレゼンスを向上することに寄与してゆく。

2.3.4. 今後の方針

レジリエンスをシステムに付与するには、(1)システムのモジュール化、(2)ネットワークの構成、(3)オープンプロトコルによるモジュール連携、(4)構成要素への AI 実装、(5)情報と動機の教育・普及、が必要となる。バーチャルグリッドなど、新たなエネルギーインフラのレジリエンスを検討する際には、上記の要素が実装、実現され、能力が適切に発揮されているか否かの評価が必要となる。このレジリエンス能力の指標として図 2.3-8 の①～③の項目が挙げられる。今後、システム設計時点でこれらの構造が作り込まれていることを評価する方法としてのシステム解析法を確立することを目指す。

また、これらの構造の定量的評価には、すでに進めている機械学習・深層学習を用いたエネルギー設備の劣化予測の研究成果、蓄電設備、先端メモリデバイス、先端パワーデバイス分野で検討した信頼度予測の研究成果を反映し、システム全体のディペンダビリティの評価に適用する。

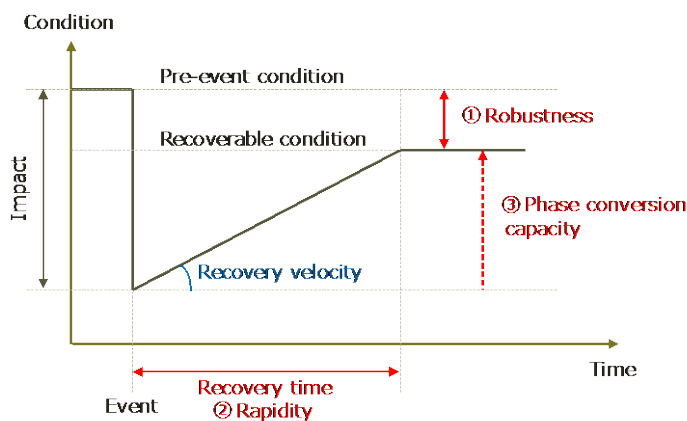


図 2.3-8, レジリエンス評価指標の概念図.

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が、本研究の Goal である。

2.3.5 業績・成果一覧

学術論文 (2019/4/1-2020/3/31)

- 1) 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). <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab7f1f>
- 1) Linghan Chen, Daisuke Ando, Yuji Sutou, Shinji Yokogawa, and Junichi Koike; "Liner- and barrier-free NiAl metallization: A perspective from TDDB reliability and interface status," Applied Surface Science, Vol. 497, pp. 143810-1-5 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143810>
- 2) Kazuyuki Suzuki and Shinji Yokogawa; "Seven View Points and Reliability Engineering Scheme for Preventing Reliability Problems," International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, pp.2050006-1-17 (2020). <http://dx.doi.org/10.1142/S0218539320500060>
- 3) Kyosuke Kunii, Shun Endo, and Shinji Yokogawa; "Bayesian inference of lifetime distribution parameter on the time-dependent dielectric breakdown with clustering defects", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 58, No. SH, SHHG02 (2019). <https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab1fd6>
- 4) 武田健吾, 澤田 賢治, 横川 慎二, 新誠一;"グラフ列挙による風力・太陽光・蓄電池複合システムの重複グループング最適化", 電気学会論文誌 C, Vol.139, No. 7, pp. 786-795 (2019). DOI: 10.1541/ieejjeiss.139.786

国際会議 (2019/4/1-2020/3/31)

- 1) H. Ichikawa, S. Yokogawa, Y. Kawakita, K. Sawada, T. Sogabe, A. Minegishi, and H. Uehara; "An Approach to Renewable-Energy Dominant Grids via Distributed Electrical Energy Platform for IoT Systems", IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids, WS-1, 1570562161 (2019).
- 2) S. Yokogawa, K. Kunii, and R. Nakazato; "Chip-level Electromigration Evaluation using GENG estimations", Proc. of Advanced Metallization Conference 2019: 29th Asian Session 2019 ADMETA plus, p. 52 (2019).
- 1) T. Murota, T. Mimura, P. Gomasang, S. Yokogawa, and K. Ueno; "Humidity Reliability of a Commercial Flash Memory for Long Term Storage", Proc. of Advanced Metallization Conference 2019: 29th Asian Session 2019 ADMETA plus, p. 86 (2019).
- 2) S. Yokogawa; "Reliability statistics for next-generation interconnects -The combination of physical modeling and statistical techniques-", 2019 MRS Spring Meeting (2019), invited.
- 3) S. Yokogawa and K. Kunii; "A Simple Prediction Method for Chip-level Electromigration Lifetime using Generalized Gamma Distribution", IEEE International Reliability Physics Symposium, P.MB.9, pp.1-6 (2019). <https://doi.org/10.1109/IRPS.2019.8720404>

書籍

- 1) 益田昭彦編著, 鈴木和幸, 原田文明, 山悟, 横川慎二; 「信頼性試験技術」, 日科技連出版社 (2019).

解説

- 1) 横川 慎二, 市川 晴久, 曾我部 東馬, 澤田 賢治, 早瀬 修二, 大川 富雄; “超スマート社会を支えるi-パワードエネルギー・システム”, 品質, Vol.49, No.3, pp.228-231(2019).

国内会議

- 1) 小池淳一, チェン・リンハン, 横川慎二; "極微細配線の課題解決にむけた金属間化合物の可能性", 電子情報通信学会シリコン材料・デバイス研究会, SDM2019-93 (2020.2.7), 特別招待講演.
- 2) 横川 慎二; "ビッグ/スモールデータ時代の信頼性解析", JEITA 半導体信頼性認定ガイドラインセミナー (2020.1.31), 招待講演
- 3) 横川 慎二, 遠藤駿; "人对機械システムにおける信頼成長の分析", 電子情報通信学会技術研究報告, 信頼性, R2019-50 (2019).
- 4) 横川 慎二, 市川晴久, 澤田賢治, 曾我部東馬, 川喜田佑介; "i-パワードエネルギーによるデータ駆動型社会基盤と不具合未然防止", 第10回横幹連合コンファレンス予稿集, C-1-4 (2019).
- 5) 横川 慎二; “ワイブルベイズ統計モデリングにおける故障物理情報の応用”, 第29回RCJ電子デバイスの信頼性シンポジウム・信頼性セミナー講演 (2019).
- 6) 武山真弓, 横川 慎二, 佐藤勝, 安井崇; "エゾシカ肉の電気的特性評価とそのおいしさの解析," 電子情報通信学会技術研究報告, 電子部品・材料、一般, CPM2019-37 (2019)
- 7) 國井喬介, 遠藤駿, 中里諒, 横川 慎二; "局所クラスタ化した欠陥を伴うTDDB寿命分布のパラメータ推定精度の研究", 第49回信頼性・保全性シンポジウム予稿集, p p. 212-217 (2019).
- 8) 遠藤 幸一, 瀬戸屋 孝, 國井 喬介, 横川 慎二; "信頼性加速試験における小サンプルサイズでの解析精度に関するシミュレーション研究", 第49回信頼性・保全性シンポジウム予稿集, pp. 218-230 (2019).
- 9) 横川 慎二, 國井喬介; "クラスター欠陥とストレス分布に基づく先端デバイスの信頼度モデリング", 電子情報通信学会技術研究報告, 信頼性, R2019-11 (2019).
- 10) 森田裕, 横川 慎二; "自動/有人レジに対する不満の差異に着目した対人自動システムへの信頼構造の分析", 第27回日本信頼性学会春季信頼性シンポジウム発表予稿集, pp. 91-94 (2019).
- 11) 横川 慎二; "「数の難題」, 再来 —LSI信頼性の果たすものこれから—", JEITA 半導体デバイス信頼性セミナー (2019.5.24), 招待講演.

特許

出願

- 1) 市川晴久, 横川 慎二, 川喜田佑介, 渡辺正晴, 小池哲哉, 内山賢, 上原広充: ヴァーチャルグリッドハブポートユニット, ヴァーチャルグリッド制御装置, ヴァーチャルグリッドシステム, プログラム, 特願2019-187455, 2019/10/11.

登録

- 1) 市川晴久, 川喜田佑介, 澤田賢治, 横川 慎二: 蓄電池管理システム, 蓄電池情報サーバ, 充放電制御装置及び蓄電池, 特許第6555714号(2019/7/19).

その他

- ・ Advanced Metallization Conference Plus 2019 ・ 大会委員長
- ・ IEEE International Reliability Physics Symposium 2019 Program Committee
- ・ JAXA/HIREC 民生コンポーネント活用検討会 ・ 委員
- ・ 日本能率協会 2019 GOOD FACTORY 賞審査委員会 ・ 委員
- ・ JEITA 半導体信頼性技術委員会 半導体信頼性用語集策定 TF ・ 客員委員
- ・ 神奈川県立多摩高等学校 SSH 運営指導委員会 ・ 委員
- ・ 日本品質管理学会 ・ TQE 特別委員会 ・ 委員
- ・ 日本信頼性学会 ・ 論文審査委員会 ・ 委員
- ・ 応用物理学会 Japanese Journal of Applied Physics, Guest editor for special issues

2.主要研究成果

- 2.4 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. 令和元年度計画概要

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) 実証実験用バーチャルグリッドの開発
- (2) バーチャルグリッド電力フロー制御の研究
- (3) バーチャルグリッドシステムのマーケティング調査
- (4) バーチャルグリッド技術の直流配電システムへの展開
- (5) 都市における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

(1) 実証実験用バーチャルグリッドの開発

2018年に開発し、10月のCEATECにおいて展示したバーチャルグリッドシステム(VGS)に基づき、バーチャルグリッド内の電力フロー制御をアプリケーションとして実装、実験できるシステムを開発した。図1に全体の構成を示す。バーチャルグリッド(VG)は、ユーザ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。図2にVG-HUBのハードウェア及びソフトウェアの構成を示す。VG-HUBの制御ソフトウェアは、ポート毎に配置されるファームウェアとこれを制御するためのVG-HUBコントローラのソフトウェアから構成され、さらに、VG-HUBコントローラソフトウェアは、ライブラリとメインソフトウェアから構成される。VG-HUBコントローラメインソフトウェアとクラウド上のVGコントローラソフトウェアが協業してVGを制御する。図3は、試作したVG-HUBの写真である。試作したVG-HUBは、USB-C PDポート、7ポートを有し、各ポートは最大60Wの電力を双方向で流すことができる。USBPD規格では、電力フローの最大値は100Wであるが、実装上の都合から60Wとした。各USB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VG-HUBネットワークを構成することにより、制御可能な電力フロー総量を拡大できる。

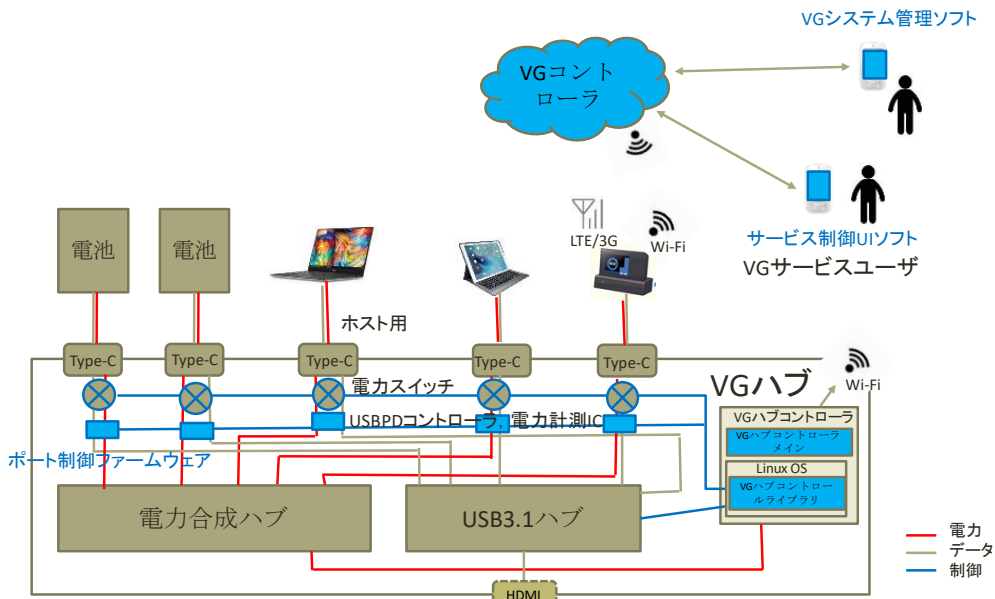


図 1 VG-HUB のソフトウェア構成

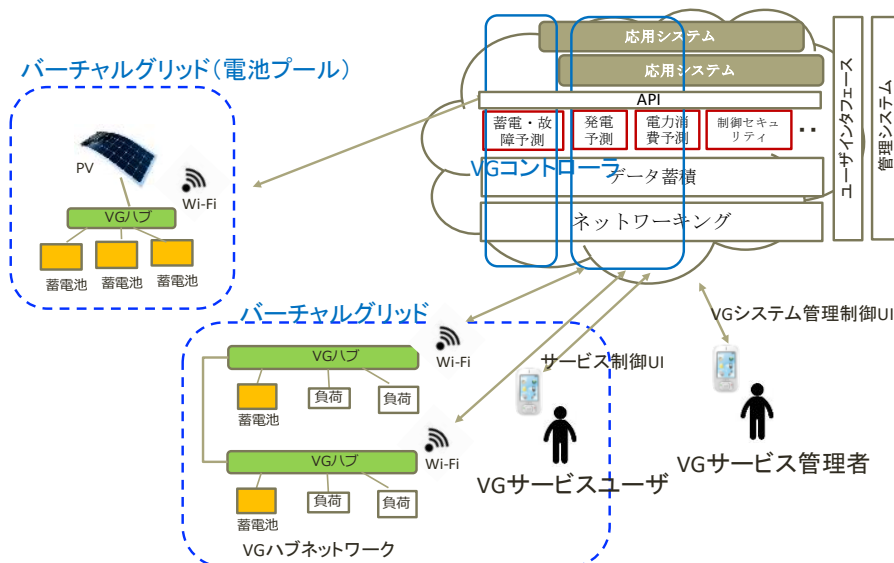


図 2 バーチャルグリッドシステム



図 3 VG-HUB 試作版

(2) バーチャルグリッド電力フロー制御の研究

VGS では、電源は、AC アダプターを経由して取り込む電力系統電源と、蓄電池や太陽光発電機など系統に接続しないローカルな電源を想定している。個別ユーザのバーチャルグリッドは VG-HUB、ローカル電源を持ち出すことにより、どこにでも設置可能な独立電源システムをユーザ自身で安全、容易に構成できる。電源の総出力と総容量は、VG-HUB ネットワークに接続する電源群の総出力と総容量から VG-HUB ネットワーク自体が消費する電力を差し引いた値に制約される。各電源デバイス、負荷デバイスは運転中に着脱可能であるため、電源も負荷も電力的に変動する。このような環境下で、ユーザ目的を達成すべく、電力のマイクロな需給マッチングを行うのが、バーチャルグリッド電力フロー制御である。負荷に比べて電源能力が十分でないとき、ユーザ目的を最大限に達成すべく、負荷に電力を分配する制御が期待される。この問題について、制御プログラム実装を交えた検討を行った結果、VG-HUB の電力合成分配ハードウェア機能の制約、負荷の動作に必要な最低電力などの負荷デバイス側の制約を守りつつ、負荷に最大電力を供給する制御手法を明らかにした。

(3) バーチャルグリッドシステムのマーケティング調査

VGS は VG-HUB と蓄電池によって AC コンセントがない場所でも容易に独立電源を構成できることが特徴の一つである。モバイルバッテリー、電源カフェサービスなど、ICT 機器のモバイル電源ニーズが顕在化している。一方、現時点の VGS では、供給可能電力は 1 ポート当たり最大 100W、電力供給対象となるデバイスは USB-C PD 準拠デバイスに限定されるなどの制約がある。USB-C PD インタフェースは、PC、スマホなどの ICT 機器で普及が加速しており、さらに一般機器への普及が期待されるものの、普及速度を予測するのは困難である。また、このため、オフィスに限定し、ニーズ調査のための実験を開始した。ICT の普及によるモバイルワークが普及し、アドレスフリーオフィス、サテライトオフィス、コワーキングスペースなど、使用場所を定めな

い ICT 機器利用の動きも活発である。電通大アクティブラーニングスペース Agora では、学生が机を自由に動かし、単独あるいはグループで学習することができるが、この機能の利用が AC コンセント位置に制約される状況が散見される。これに着目し、Agora において学生に大型ポータブルを貸し出し、利用動機と実態を調査する活動を開始した。

また、ICT 機器の管理者と使用者とが異なり、大量の ICT 機器の充電管理、電源管理に関する管理者側ニーズが拡大することが予想される。その一例として、小中高校での PC、タブレットの一人一台導入を目指す、政府の GIGA スクール構想に着目し、先進的な複数の学校を訪問し、PC、タブレットの教育への活用における電源ニーズについてヒヤリングした。これにより、多数のタブレットの充電管理、自由レイアウト教室や運動場でのタブレット利用などにおけるニーズについて情報を得ることができた。

(4) バーチャルグリッド技術の直流配電システムへの展開

地球温暖化対策のために 2050 年までの再生可能エネルギーの主力電源化（100%化）が世界的目標となっている。最有力な再生可能エネルギーである太陽光エネルギーを主力電源とする場合、電力は究極的には地産地消される可能性が高い。すなわち、発電場所の近辺で電力が配電され消費することで、送配電コストが削減され、災害等に対する耐力も向上が期待される。電力を地産地消する場合、電力系統において、長距離送電の役割が大幅に縮小し、近距離配電システムの役割が拡大する。太陽光発電電力は直流であり、負荷も直流負荷が多いために直流配電システムの検討が進められているが、2050 年までに移行すべきゴールとしての次世代電力システム像が明確でないことが指摘されている。VGS は電力の需給マッチングを緻密にデジタル制御すること、個別ユーザによる電力フロー制御を前提とすることなど、先行直流配電技術にはない特質を包含する。VGS の特徴を活かす次世代直流配電システムについて、直流配電システム事業に大規模に取り組もうとしている企業との共同研究立ち上げを推進中である。

(5) 都市における太陽光発電電力の地産地消に関する研究

上述したように、太陽光発電による電力の地産地消が浸透することにより、電力網は大きく変化する。一方、人口の都市集中は、電力消費地近辺での太陽光発電場所を確保しにくく、太陽光発電コスト、蓄電コストが低下しても、地産地消が制限される可能性がある。少子高齢化に対する社会の持続性確保のために、住民移住をも伴うコンパクトシティ化の議論もなされており、次世代電力システムの設計は都市設計の一部として検討されるべき課題でもある。太陽光発電を道路面や壁面で行う技術も進展しつつあることを考慮し、都市における太陽光発電電力の地産地消可能性に関する企業との共同研究を開始した。

III. 業績・成果一覧

学術論文 (2019/4/1-2020/3/31)

- 5) Jin Mitsugi, Yuusuke Kawakita, Kiyoshi Egawa, Haruhisa Ichikawa, "Perfectly Synchronized Streaming From Multiple Digitally Modulated Backscatter Sensor Tags," IEEE Journal of Radio Frequency Identification, Vol. 3, No.3, pp.149-156, September 2019. DOI:10.1109/JRFID.2019.2914246

産学連携・競争的資金実績

国際会議 (2019/4/1-2020/3/31)

- 4) Jin Mitsugi, Hiromu Kamei, Yuusuke Kawakita, Haruhisa Ichikawa, "Real-Time Separation of Collided Signals in Multiple Zones Backscatter Communication System," 2019 IEEE International Conference on Wireless For Space and Extreme Environments (WiSEE). DOI: 10.1109/WiSEE.2019.8920346
- 5) H. Ichikawa, S. Yokogawa, Y. Kawakita, K. Sawada, T. Sogabe, A. Minegishi, H. Uehara, "An Approach to Renewable-Energy Dominant Grids via Distributed Electrical Energy Platform for IoT Systems," IEEE SmartGridComm (2019). DOI: 10.1109/SmartGridComm.2019.8909762

解説

- 1) 横川 慎二, 市川 晴久, 曾我部 東馬, 澤田 賢治, 早瀬 修二, 大川 富雄: 超スマート社会を支えるi-パワードエネルギー・システム, 品質, Vol.49, No.3, pp.228-231(2019).

国内会議

- 1) 横川 慎二, 市川 晴久, 澤田 賢治, 曾我部 東馬, 川喜田 佑介: i-パワードエネルギーによるデータ駆動型社会基盤と不具合未然防止, 第10回横幹連合コンファレンス予稿集, C-1-4(2019).
- 2) 田村 光汰, 薩川 里奈, 川喜田 佑介, 戸辺義人, 市川 晴久: USB-PDにおける電力の合成分配の制約に関する検討, 計測制御学会 計測部門スマートセンシングシステム部会 研究発表会, 2019/11/15-16.
- 3) 田村 光汰, 川喜田 佑介, 戸辺 義人, 横川 慎二, 市川 晴久: US-PDを活用した電力の合成分配制御に関する検討, 情報処理学会第82回全国大会, 252-5258 (2020/3/5-7).

特許

出願

- 1) 市川晴久, 横川慎二, 川喜田佑介, 渡辺正晴, 小池哲哉, 内山賢, 上原広充: ヴァーチャルグリッドハブポートユニット, ヴァーチャルグリッド制御装置, ヴァーチャルグリッドシステム, プログラム, 特願2019-187455, 2019/10/11.

登録

- 1) 三次, 市川, 川喜田: 無線通信システム, 特許第6498410 (2019/3/22) .
- 2) 市川晴久, 川喜田佑介, 澤田賢治, 横川慎二: 蓄電池管理システム, 蓄電池情報サーバ, 充放電制御装置及び蓄電池, 特許第6555714号(2019/7/19).

報道発表

- 1) バーチャルグリッドシステム試作完成についての報道, 日刊工業新聞(2019/12/13).

VI. 令和2年度の方針と計画

2050年まで実現すべき再生可能エネルギー100%の電力システムアーキテクチャを設計、提案し、その構築に向けた研究開発活動の組織化を目指して下記を推進する。

(1) インターネット型電力システムアーキテクチャの研究

企業との産学連携を実現し、再生可能エネルギー100%化電力システムとして、電力業界が推進する直流配電システム技術とバーチャルグリッド技術を融合した、インターネット型電力システムアーキテクチャの研究開発を推進する。インターネット型電力システムでは、ユーザの電力システムを自律的に統合して電力インフラを形成することにより、ユーザ参加のインフラ投資によるインフラ構築の迅速化と投資リスク分散、システムレジリエンスの実現を狙う。

(2) インターネット型電力システム電力フロー制御の研究

VG-HUB ネットワークの電力合成分配性能は、ネットワーク構成と電力フロー制御によって決まる。電力フロー制御は、VG-HUB ネットワークの電力合成分配能力を引き出し、ユーザ要求を最大限に実現するための制御である。電力供給に関するユーザ要求表現を負荷への電力供給において守るべきポリシーとして与えてフロー制御する、ポリシーアウェア協調給電制御技術、VG-HUB ネットワーク上の電力フロー制御技術について、これまで行ってきた研究を基礎に、インターネット型電力システムの電力フロー制御技術を研究する。

(3) 都市における太陽光発電電力の地産地消に関する研究

再生可能エネルギー電力100%化時代の電力システムの外部要件を見積もることを目的に、企業との共同研究として開始した標記研究を推進する。

V. 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

2.5 スマートオフィスにおけるエネルギー消費と生産性に関する実証環境の構築

横川 慎二教授

2.5 スマートオフィスにおけるエネルギー消費と生産性に関する実証環境の構築

2.5.1. 目的

このプロジェクトは、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フリーアドレスな環境をとりあげ、そこでのエネルギー消費予測や消費の最適化制御、自律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ものである。本研究センターが行っている各基盤技術研究を上記空間に実装し、その有効性の検証や、新たな課題の抽出を行うための環境構築を目的としている。

2.5.2. 背景

エネルギーシステムが様々な規模の分散型システムへと移行してゆくことは、そのエネルギーの消費の形態にも影響を与えるものと考えられる。発展途上国における SHS (Solar Home System) は、大規模の送電網の敷設が難しいという背景によって普及が進んでいる。これを先進国に置き換えれば、送電網敷設を必要としないとも考えられる。すなわち、固定されたエネルギー供給とそこでの消費に縛られず、様々な場所で、様々な形態での消費を行うことが可能になるものと思われる。

デバイス性能や情報通信環境の向上により、「いつでもどこでも働ける」ことが現実になりつつある。この状況は、目的に合わせて働く場所を自由に選択できるというワーカーのニーズに応えると同時に、企業にとって多大な固定費用を発生させ続けるオフィスを変革することが出来る。近年では街中のカフェで仕事する姿も多くみられるだけでなく、コワーキングスペースビジネスが注目を集めていることから、一定のニーズがあるものと考えられる。さらに、ワークライフバランスの確保や雇用関係に寄らない働き方（複業という働き方）などの労働政策も、近年話題になっている。すなわちこれらの傾向は、将来ワークスペースそのものが分散化されることを示唆している。さらには、昨今の COVID-19 の拡大抑止のための取り組みのような、感染症対策など社会構造に大きな影響を与える事象に対する防災スキームのもとでは、各個人の業務を進める場所をいち早く自立させ、自律的に運用する仕組みが必要である。さらには、これらを情報通信によりネットワーク化して、大局的なレジリエントを向上させるとともに、各々の業務の価値を高めることを目指さねばならない。

一方で、ワークスペースの重要性はより高まる可能性が高い。これは、ワーカー間のコミュニケーションと、それによる意思決定の迅速化などが、フィジカルな空間でなければ担うことの出来ないためである。また、協業による学習効果やイノベーションは、我が国の発展にとって欠くべからざるものである。

これらのニーズを満たす社会的基盤として、自由度の高い分散型オフィスのエネルギー供給システムとしての分散型エネルギーシステムの基礎設計や環境との関連、さらには学習者やワーカーの生産性への影響を把握し、環境制御することが重要である。

2.5.3. 現在までの取り組み

上記の背景の下で、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。

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、220名以上を収容可能な実験的学修スペースで、利用者が無線プレゼンテーション機器、プロジェクター、モニターなどを使ってプレゼンテーションの練習を行ったり、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。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(図2.5-1)。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る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う。



図 2.5-1, 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).



図 2.5-2, データ統合環境によるセンサーデータの可視化の例.

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環境を構築した (図 2.5-2). 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. この整然化の概念を図 2.5-3 に示す.

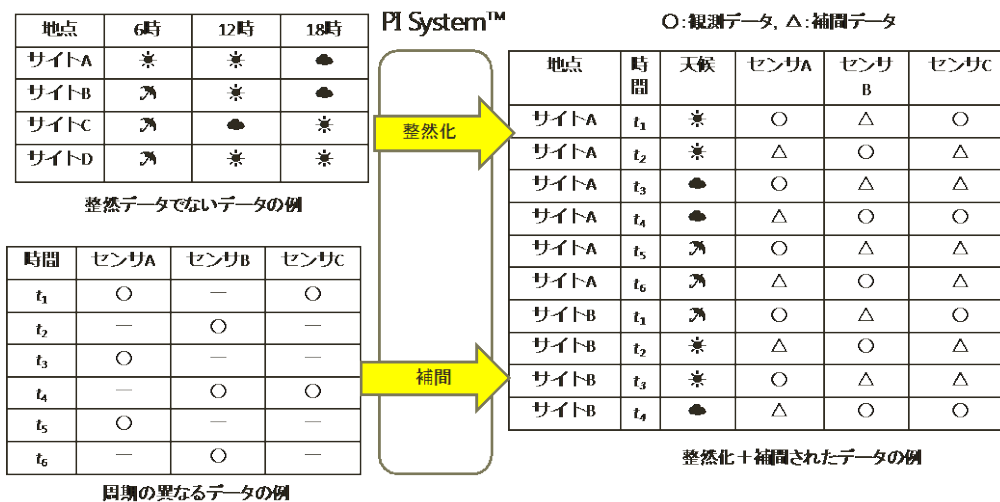


図 2.5-3, データの整然化の概念図.

2.5.4. 課題抽出の取り組み

現状の Agora 環境に関する課題を抽出するために、利用者を対象とした使用・環境状況に関するアンケートを、学術情報課と共同で実施した (2019.11.19-12.20). 回答者の属性、図書館の利用状況、満足度に加えて、不備や改善してほしい点などを Google form を用いたアンケートとして収集し、その結果を分析した. アンケートの実施にあたり、教職員には学内一斉メールで回答依頼を行った. 学生には、図書館内でのアナウンス並びにツイッターでの呼びかけを実施した. 有効回答数 200 の結果を用いて、現

状について分析した。

図 2.5-4 に、回答者属性のパレート分析を行った結果に示す。学域 1, 2, 3 年生, 教育研究系職員を中心とし、利用頻度は週 1～3 回および毎日という回答者が多い。利用頻度が高い回答者に偏った結果であると解釈できる。

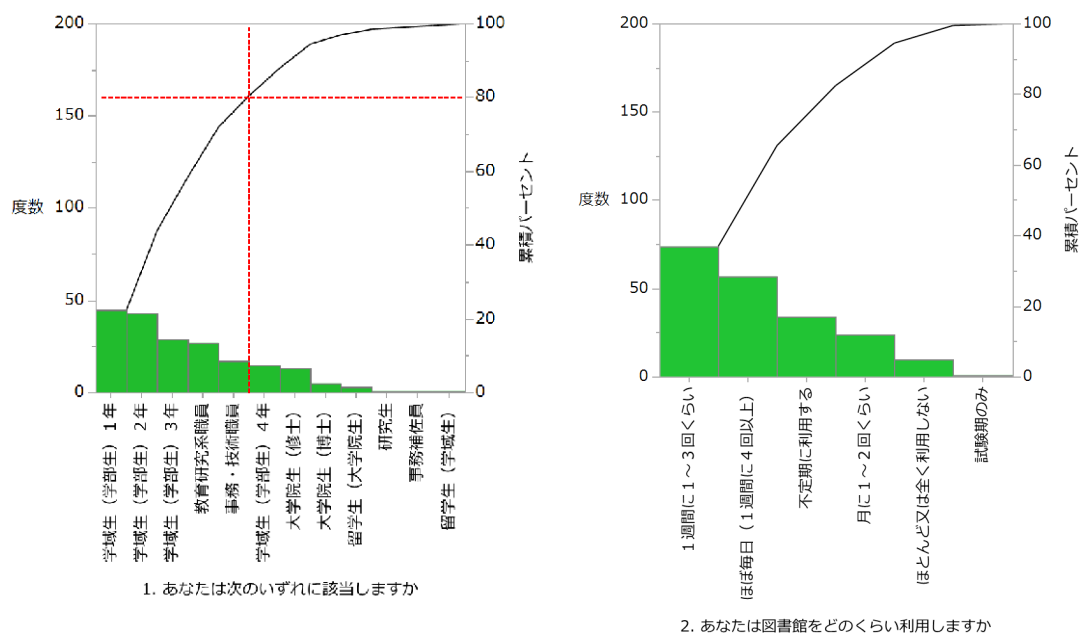


図 2.5-4, アンケート回答者属性のパレート分析。

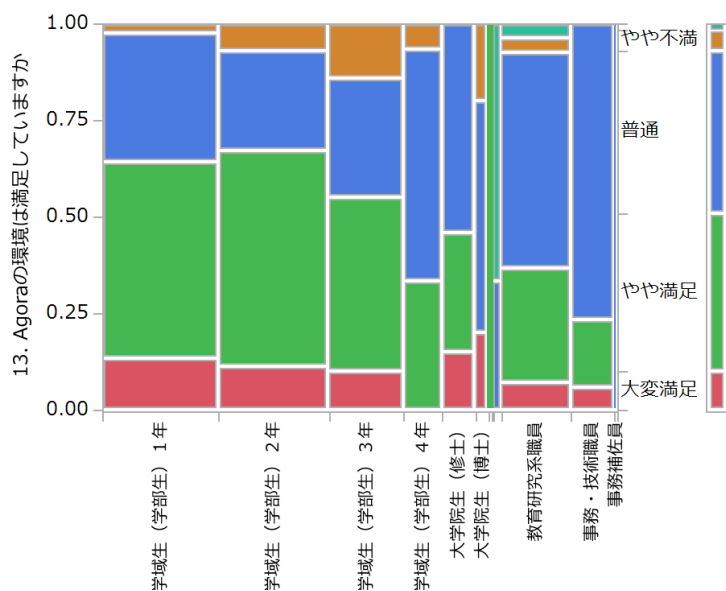


図 2.5-5, 属性毎の満足度のモザイクプロット。

属性毎の満足度を示したモザイクプロットを図 2.5-5 に示す。満足度という曖昧な問いに対しては、「大変満足」および「やや満足」という回答が多いことがわかる。そこで、具体的な課題を抽出するために、自由記述のテキストを形態素分析の手法を用いて分析した。出現頻度が高い Ngram を示した結果を図 2.5-6 に示す。主に①座席数, ②電源タップの不足, ③換気に関する要求が高いことがわかる。

Agora			
	句	度数	N
不満なし	改善点はない	67	3
	不満や改善点	67	3
座席	座席数を増やせ	62	4
電源	電源タップ	37	2
	増やす電源タップ	28	3
環境	増やす電源	28	2
	温度の調整	23	3
座席	形状の変更	18	3
	材質や形状	18	3
	騒音座席	15	2
環境	増やせ椅子	13	2
	温度の調整湿度	12	4
	調整湿度の調整	12	4
	湿度の調整	12	3
環境	調整湿度	12	2
	プロジェクターやディスプレイ	9	3
	増やすホワイトボード	9	2
	湿度の調整換気	8	4
	調整換気	8	2
	調整座席	7	2
	温度の調整座席	6	4
	増やせプロジェクターやディスプ...	4	4
wifi	4	2	
換気座席	4	2	
増やすプロジェクター	4	2	

図 2.5-6, 自由記述の Ngram 解析結果.

座席数については、密集度や什器の数などの問題にも対応するため、一概に結論出来ない。ただし、現状のレイアウトが（机も椅子も可動式であるにも関わらず）コンセント近傍に偏ってしまうことが、空間の有効利用を妨げている可能性がある（図 2.5-7）。



図 2.5-7, Agora 内の可動式机, 椅子のレイアウト. 赤丸はコンセントの位置.

本学の学生が Agora を利用するにあたり、最も大きな目的は課題やレポートを作成することと考えられる。また、その際には PC, タブレット, スマートフォンを充電することも目的としている。そのために、コンセントから離れることができない状況にあると思われる。現在 iPERC において研究開発中のバーチャルグリッドシステムが目指すべきニーズの一つであるバッテリー給電が実現されれば、座席数の課題と給電の課題の二つに対する解となる可能性がある。そこで、バッテリーのニーズに関する詳細調査を開始した。同時に、固定電源工事を実施することなく電源供給の対応が可能となるかを検証する。こ

れまでに、市販の大容量蓄電池の貸出サービスを実施し、利用場所や利用方法などを調査する（図 2.5-8）。



図 2.5-8, 蓄電池貸し出しサービスに用いる大容量リチウムイオン二次電池.

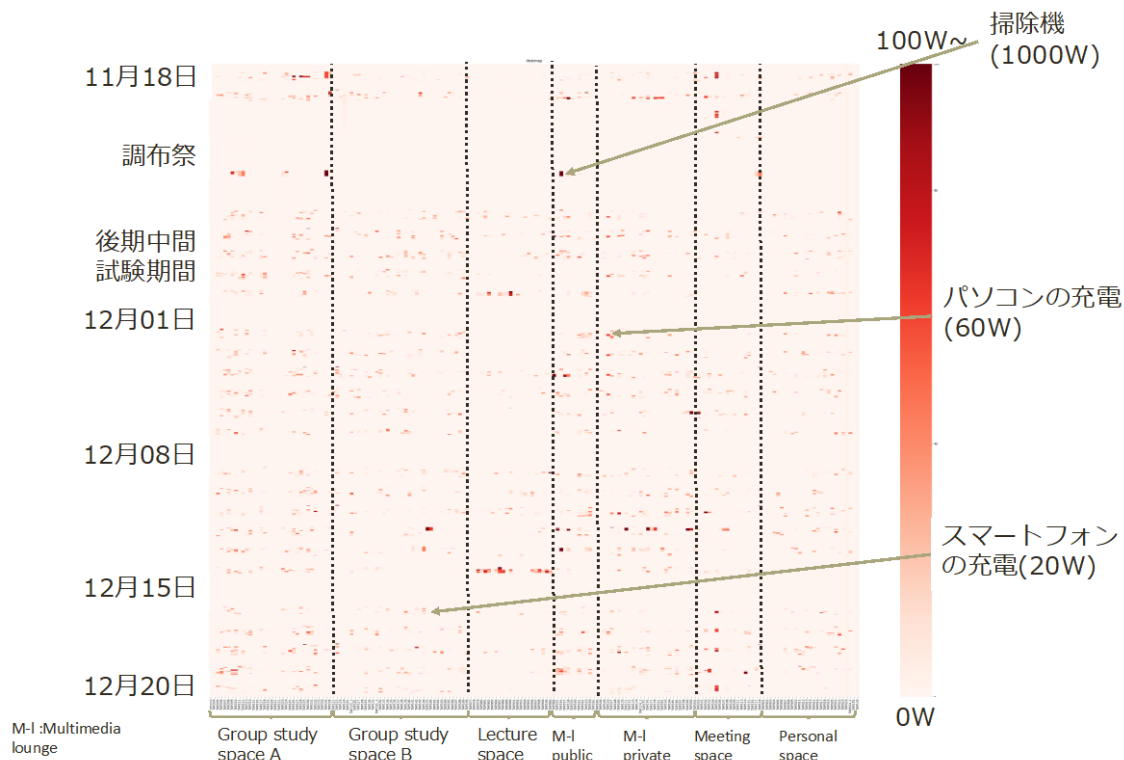


図 2.5-9, 局所電力消費の可視化の例.

この貸し出しサービスの効果を考察するために、Agora 内の各エリアにおけるコンセント単位の電力消費の現状を図 2.5-9 のように可視化して示した。場所の性質上、使用されているデバイスの種類はほぼ限られている。この頻度や総量が蓄電池貸し出しサービスによって変化するかが、今後着目する点である。更に、その効果を人流センサーの反応数によって考察することも検討している。

また、整然化したデータによって、既存センサー群の組み合わせによる課題を抽出した。図 2.5-10 にある 1 日の CO₂ 濃度と人感センサー反応量の変動について示す。建築物環境衛生管理基準値（厚労省）で適切と示される閾値である 1000ppm を超える時間が存在していることがわかる。

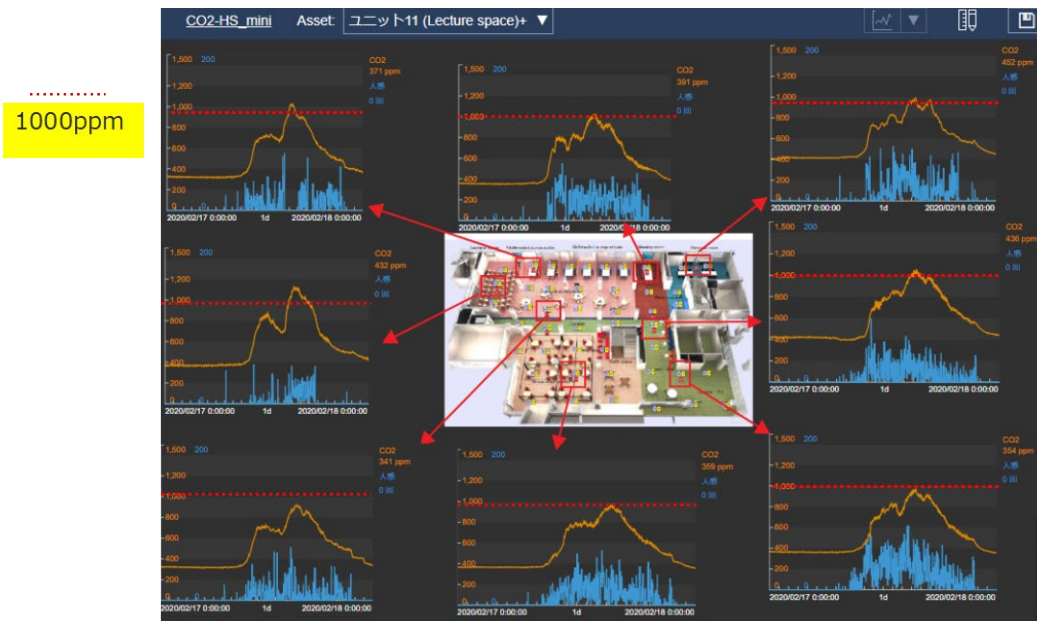


図 2.5-10, CO2 濃度と人感センサー反応量のある 1 日の変動.

このような環境の課題は、特定の曜日、特定の時間に生じているものと思われる。図 2.5-11 に示されるように、CO2 濃度は月曜日から木曜日にかけて徐々に高い日が増加し、金曜日には平均的に低くなる。また、午前中から徐々に増加して、17 時近辺が最も高くなることがわかる。

また、年間を通じて利用者の数は本学の時間割と高い相関があることがわかる。図 2.5-12 に示されるように、滞在者数を示す人感センサーの反応数は午前中に少なく、午後 3、4 限に増加することがわかる。また、履修者数の多い 3、4 限に出席した後の 5 限の時間の滞在者が最も多いことがわかる。人間一人当たりの CO2 排出量は約 18L/h 人と大きいため、図 2.5-12 の人感センサーの反応の時間変化と、図 2.5-11 の CO2 濃度の時間変化が同じような変動を示すことは矛盾しない。ところが、図 2.5-10 に示されるように、局所の人感センサーの反応量が小さいエリアでも CO2 が他より高くなる場合も見て取れる。すなわち、空調による空気の流れなどを考慮して、大域的な空調制御が必要となることが示唆される。

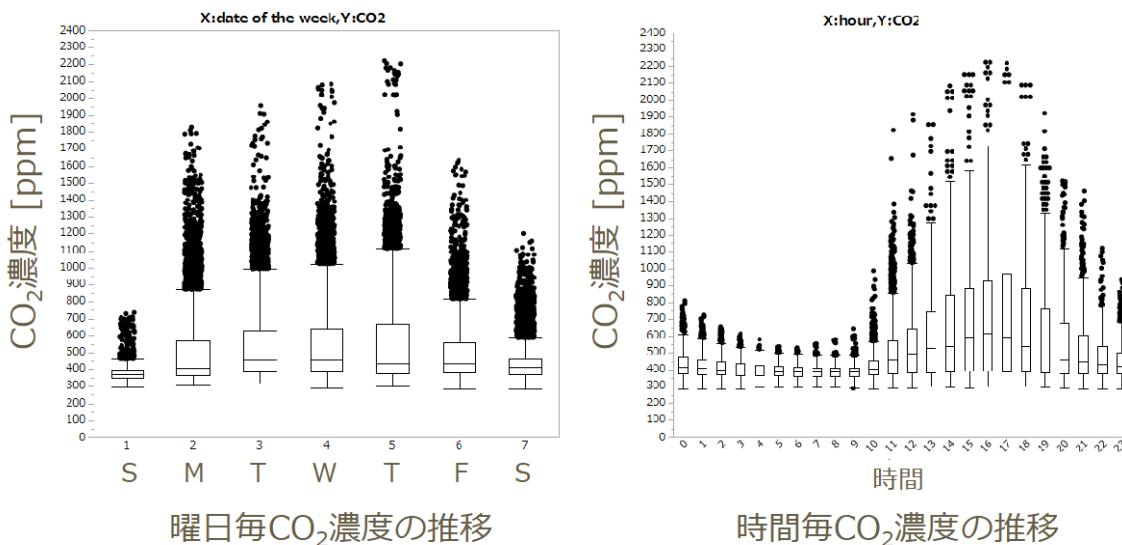


図 2.5-11, CO2 濃度の週間変化と時間変化の箱ひげ図.

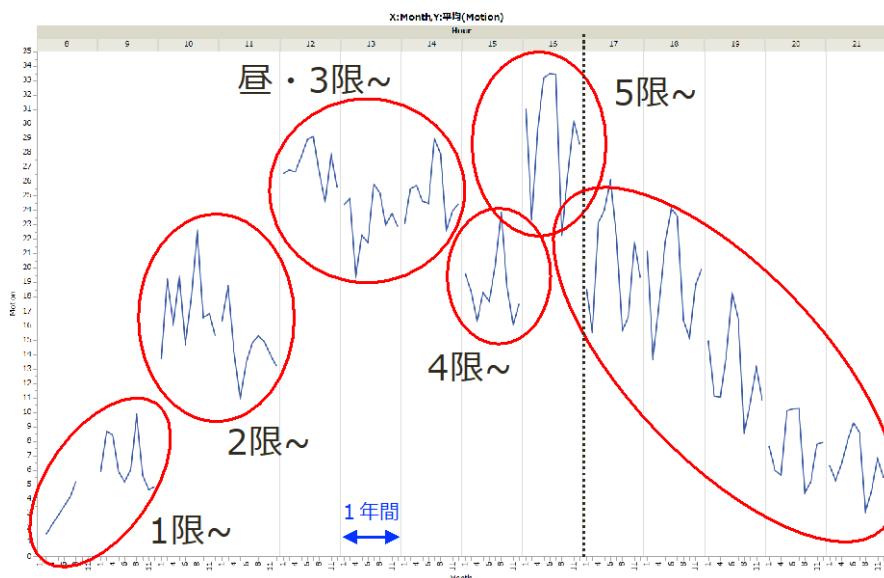


図 2.5-12, 人感センサー反応量の 1 日の変化.

2.5.5 今後の方針と計画

2018 年度末より観測を開始したセンサーネットワーク環境を用いて、超スマート社会の社会基盤としてのスマートオフィスや、小規模分散型エネルギーシステムの検証および課題発見を目的とした研究を行う。主に以下の方針と計画をもって進める。

1) 分散型エネルギーシステムの実証実験

蓄電池貸し出しサービスによる実証実験などを通じて、コワーキングスペースにおける分散型エネルギーシステムの運用について、そのメリットとデメリットを調査し、小規模分散型エネルギーシステムが有すべき特性について検討する。さらに、同スペースでの生産活動に対する効果などについて、環境条件を含めた検証、分析を行い、オフィス生産性向上に向けた環境構築・制御方式に関する研究を行う。

2) 電力消費予測や重複グルーピングなどの従来研究の検証

大規模分散型再生可能エネルギーの最適化制御に関する深層強化学習最適化手法や、運用計画分散最適化のための重複グルーピングなどの従来研究成果を小規模領域である Agora のセンサーデータによりシミュレートし、有効性の検証と改善事項を抽出する検討を開始する。小規模分散型エネルギーシステムのネットワークングを想定した場合の大局的最適化を可能とする修正に関する研究を進める。

3) エネルギーインフラに関する「信頼と安心」の検証

スマートオフィス環境における自律分散エネルギーシステムの運用に際し、利用者の心理的特性、特に信頼と安心と生産性に関する相関性の研究を推進する。分散型エネルギーシステムにおける社会的メリットを明らかにするとともに、テクノロジー・イノベーションを促すための適切な信頼の確立の要素について解明することが目的である。

この研究については、異なるヒト-機械系のシステムについての研究を先行して進めた。その状況を後述する。

今後さらに社会実装が進むと考えられるヒト-機械の系において、信頼の不足や不適切な形成に起因する不具合を未然防止することを目的とし、その形成過程の分析、考察を行った。そのために、スーパーなどで導入が進んでいるセルフレジと有人レジの信頼構造の対比を通して、対人自動システムに対するヒトの信頼形成の特性に着目した。製品やサービスに対する膨大な意見が収集された不満調査データセットを用いて、有人レジおよびセルフレジに関する消費者の不満について、統計解析とテキストマイニングの手法を用いて抽出し、両者の不満を比較・分類した。さらに、分類された不満の特徴分析からヒト-機械インターフェイスの特性の違いによる信頼の差異を分析、考察した。

小売業、外食産業における人手不足の深刻化を受け、作業の一部をセルフ化するセルフレジが、昨今急速に普及している。しかし、会計の一部がセルフ作業化することで顧客の負担が増加し、これを解消するために通常のレジと同等のサポート作業量が必要になるなど、結果として人手不足の解消手段になっていない店舗も一部見受けられる。しかしながら、現在我々が置かれているコロナ禍のような非常事態において、会計や支払いの自動化を普及させることは喫緊の急務である。上記の現状課題への対策としては、音声による自動案内や、会計の一部の作業だけを自動化する構成事例もある。いいかえれば、新しいタイプの対人自動システムであるセルフレジは、従来のレジシステムと違い様々な構成と課題が混在しており、現在はヒトを機械に置き換える際の問題が顕在化している状況にある。

一方で、Information and Communication Technology (情報通信技術) をプラットフォームとして誕生する様々な対人自動サービスを実現する際には、高度な機能を利用者のスキルに依存せずに提供するための工夫が必要となる。複雑な機能を使いこなすためには、操作を単純にするだけでは十分ではなく、機械が利用者をサポートして目的を果たすための機能が対人自動システムに求められるようになると考えられる。見方を変えれば、ヒトが機械を信頼し、早期に使いこなすことが出来るようになるためのインタラクションを、機械側に組み込むことが重要になると考えられる。

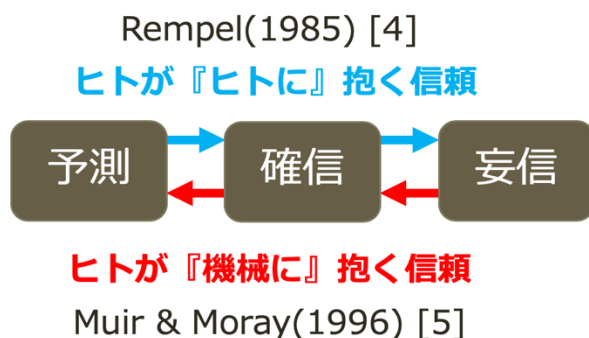


図 2.5-13, FRAM による創発的不具合の構造分析結果。

先行研究において、自動システムに対して専門知識のない利用者は、日常の作業が自動システムに置き換わることに懐疑的であることが示されている (江間, 2016)。特に、機械に対する信頼は人に対する信頼と同様に、使ってみることからのみ発生する。ところが、図 2.5-13 に示されるように、その信頼の醸成過程は対人のケースとは異なるプロセスを経由することが知られている (伊藤, 2016)。

ヒトが「ヒトに」対する信頼は、相手の行動に対する「予測のしやすさ」(Predictability)という次元から、これまでの経験の範囲内で相手を頼ることが可能かを判断する「確信度合い」(Dependability)という次元に移行し、未来や不確実な状況においても相手を頼ることが可能かを判断する「盲信」(Faith)の次元に行き着くとされている。一方で、ヒトが「機械に」抱く信頼は、意図を持たない機械システムに対する期待や希望に基づく「盲信」から、過去に機械システムを使った経験から得られた感覚としての「確信」に移行し、使用を重ねてうまくいく、いかないがはっきりわかるようになるような「予測」へと移行する。

これらを前提にすると、現在のセルフレジのシステムにおいて、利用者は機械に対して十分な「信頼」を抱いている状態とは言えない。この「信頼」は、新しいシステムの社会実装と普及に対して大きな影響を与えるだけでなく、それが適切に獲得されていないときにはヒューマンエラーを誘発するなど、不具合の要因となる可能性がある(橋本, 1980. 前東, 三輪, 寺井, 2014)。

本研究では、今後さらに社会実装が進むと考えられるヒト-機械の系において、信頼の不足や不適切な形成に起因する不具合を未然防止することを目的とし、その形成過程の分析、考察を行った。そのために、セルフレジと有人レジの信頼構造の対比を通して、対人自動システムに対するヒトの信頼形成の特性を分析した。製品やサービスに対する膨大な意見が収集された不満調査データセットから、有人レジおよびセルフレジに関する消費者の不満を統計解析とテキストマイニングの手法を用いて抽出し、両者の不満を比較・分類した。さらに、分類された不満の特徴分析からヒト-機械インターフェイスの特性の違いによる信頼の差異を分析した。得られた結果の検証を目的として、すでに広く普及している現金自動預け払い機(automated teller machine; 以下 ATM)との比較検討を行った。

使用したデータは、国立情報学研究所が、株式会社 Insight Tech から提供を受けて研究者に提供している「不満調査データセット」を用いた。収集期間は2015年3月18日から2017年3月12日であり、投稿したユーザー数は延べ10万6千173人、データの総数は5,248,840件である。Web上の投稿フォームに入力された業界業種の属性データと、不満に関する自由記述によって構成されている。分析の流れを、図2.5-14に示す。

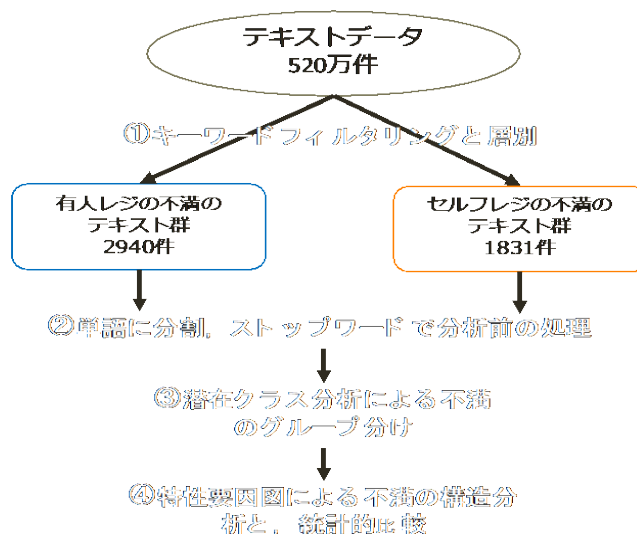


図 2.5-14, レジシステムに関する不満調査のフロー。

対象としたデータセットには様々なサービスや製品に関する情報が含まれる。そこで、極力同一条件の下でセルフレジと有人レジの比較を行うために、業種等によるデータの層別を行った。まず、属性データに基づき業界と業種を絞り込み、その後キーワードでフィルタリングして、レジ業務に関連する不満を抽出した。次に、適切かつデータ数の多い層を抽出するための、段階的なパレート分析を実施した。その結果、category, subcategory において最多件数となる「外食・店舗」かつ「コンビニ・スーパーマーケット」を分析対象とした。以上により、鉄道の切符券売機、セルフのガソリンスタンド、銀行のATMなど、すでに信頼の形成が完了している対人自動システムが含まれないデータセットとなった。

次に、分析の対象群とした不満データの記述部分に対し、「セルフレジ」もしくは「レジ」と「会計」という単語でフィルタリングを実施した。その結果、有人レジは2940件、セルフレジは1831件のデータが抽出された。これらのデータをコーパスとして分析を進めた。

得られたコーパスについて、テキストマイニングの手法を用いた分析を行った。はじめに、2文字以上の単語の集まりに分割し、特徴の分析に寄与しない単語を排除するため、SlothLibのストップワードリストを用いたフィルタリングを実施した。次に、得られた結果に潜在クラス分析を用いたグループ層別を行った。潜在クラス分析は、データ群の背景に潜在的な変数が存在すると仮定し、データをその特徴によってクラス分けする手法である。単語の出現確率を二値データとして扱うことで、カテゴリカル変数である単語の分析に利用することができる。本研究では、推定過程を通して算出されるベイズ情報量規準 (Bayesian information criterion; BIC) によりクラス数を決定した。その結果、セルフレジではクラス数3、有人レジではクラス数4が得られた。

得られた各クラスの不満の要因について特性要因図を用いた特徴分析を実施した。結果として発生する不満を特性として扱い、同クラスからランダムに抽出した不満100例の分析結果から特性要因図を作成した(例; 図 2.5-15)。各不満クラスで要因がどのように不満につながるのかを考察することにより、不満が発生する構造を各クラスで明らかにし、それぞれ解釈することが出来る。

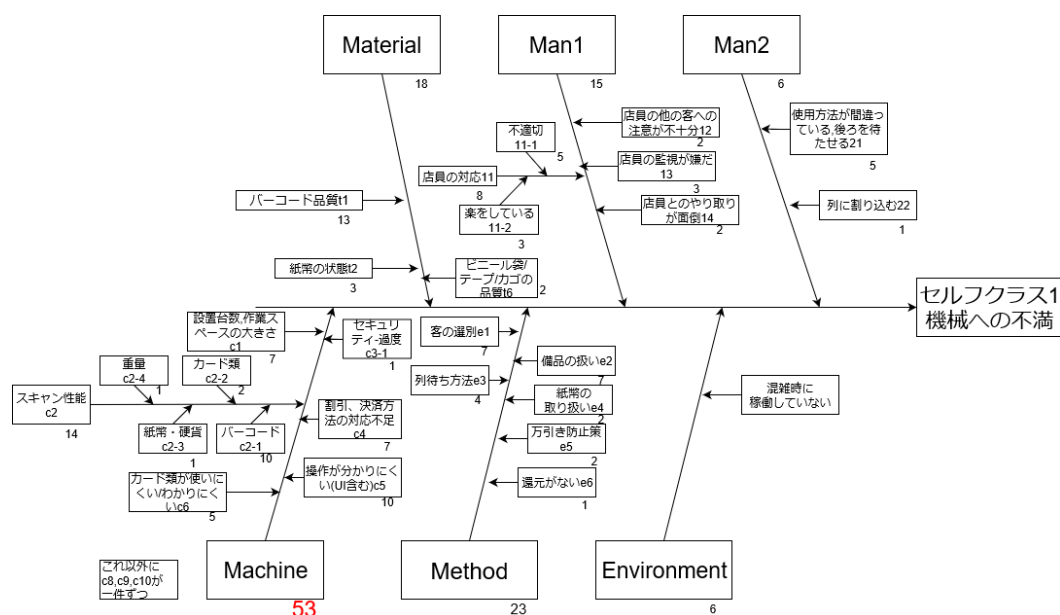


図 2.5-15, 特性要因図による分析例。

各クラスの分析を通して得られた結果を、先行研究による信頼の段階と信頼の対象区分（山岸，1988）によって分類した結果を図 2.5-16 に示す。有人レジクラスは、システムが一般に用いられるようになって久しいため、エンドユーザーが有人レジシステムに抱く信頼レベルは高く、相手の能力や意図を推し量ることを超えた「妄信」の段階の不満が多い結果となった（有人クラス 1, 2, 3）。そのため、ヒトの意図や能力が、自身の意図、すなわち期待や希望と異なると判断された時に、不満が生じるという傾向がある。

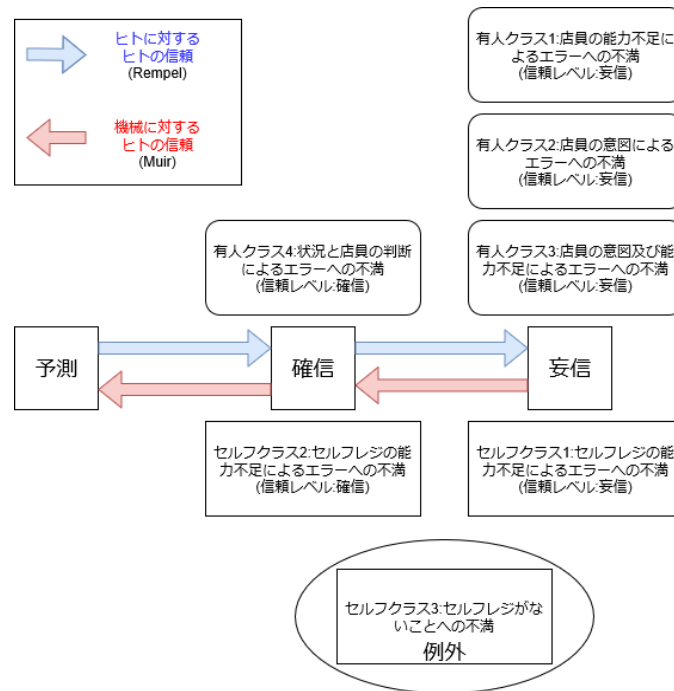


図 2.5-16, レジシステムの不満クラスと信頼レベルの比較

一方で、セルフレジは機械であるため、その意図が対象となるのではなく、機能が不満の対象となる。セルフレジは一般には稼働して間もなく、またその機能・構成に様々なタイプが存在するため、現時点ではユーザーはシステムに対して馴染みのない状況にある可能性が高い。いいかえれば、現在は機械に対する信頼形成の初期段階である。そのため、セルフレジの機能を初めて実感し、想定より低いことを不満としている表現が多く見受けられる。したがって、「妄信」の段階にあたるセルフクラス 1 の件数が多くなった。一方で、セルフクラス 2 の表現は、具体的な原因となる対象を指して不満を説明していることが、共起ネットワーク分析によりわかった（図 2.5-17）。すなわち、一部のエンドユーザーは既にセルフレジに習熟し、機械の能力不足によるエラーへの不満を、特定の状況・条件を指して表現出来る、「確信」の段階にあると考えられる。

以上より対人自動システムの不満の解消のためには、機械の有する機能や能力を、ユーザーに明確に伝えることにより、信頼の段階を「確信」まで進めることが必要と考えられる。また、「確信」の段階に到達したユーザーからは、具体的な状況における不満が提示されるため、その分析と対応によって、システム全体の品質向上が可能と考えられる。

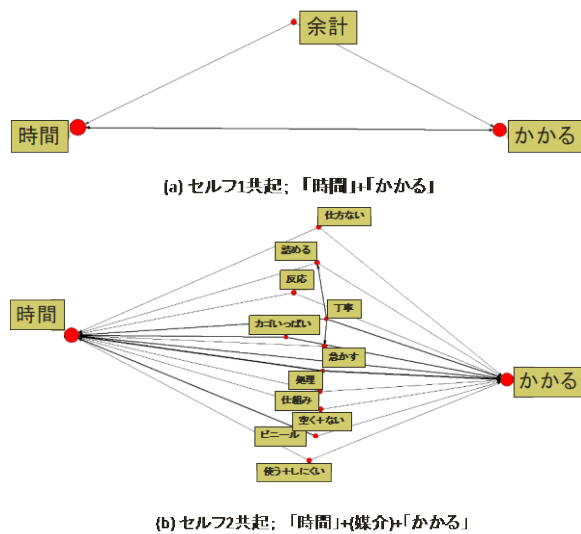


図 2.5-17, 共起ネットワークによるクラス比較.

すでに一般に普及して久しい対人自動システムとして、ATM に関する不満データの分析を、レジシステムと同じ要領で実施した。その結果、ATM に関する不満クラスはセルフレジに関する不満クラスと対応したものといえる結果が得られた。対人自動システムとしての機械の機能に関する不満である ATM クラス 2 は「確信」もしくは「予測」のレベルに達していると考えられるため、普及より十分な期間を経て、機械システムとしてほぼ完成された状態と考えられる。使用した ATM の機能が、他の機体と比較して不足していると判断された際に不満が発生するものと思われる。ATM クラス 1 はヒトとの比較によって機械機能の柔軟性不足を指摘したものであり、特定の要求事項における「盲信」のレベルにあるものと考えられる。前者は具体的に表現されたものであり、実際の例をもって品質改善策が具体化されている。

以上のように、不満テキストの分類と分析より、有人レジ/セルフレジで発生する不満は、信頼レベル、および対象の意図の有無により異なることが分かった。セルフレジのような対人自動システムに対しては、エンドユーザーは「意図に対する信頼」による機械の能力の推定を行わず、機械の能力不足に対してのみ不満を有すと考えられる。信頼の段階が「確信」に到達したユーザーからの情報は、具体的に表現された不満が提示され、品質向上と不具合の未然防止への応用が可能になると考えられる。

これらのヒト-機械システムの信頼構造に関する分析結果は、安全・安心が実用化の鍵を握る次世代のエネルギーシステムの設計において、重要な知見を示すものである。今後はエネルギーデバイス、システムに関する同様な分析を進めて、一般的な構造とエネルギーシステムに特有の特徴に関して分析、考察する。

2.主要研究成果

2.6 次世代プリントブル太陽電池・熱電素子の研究開発と新応用分野の開拓

早瀬 修二 特任教授

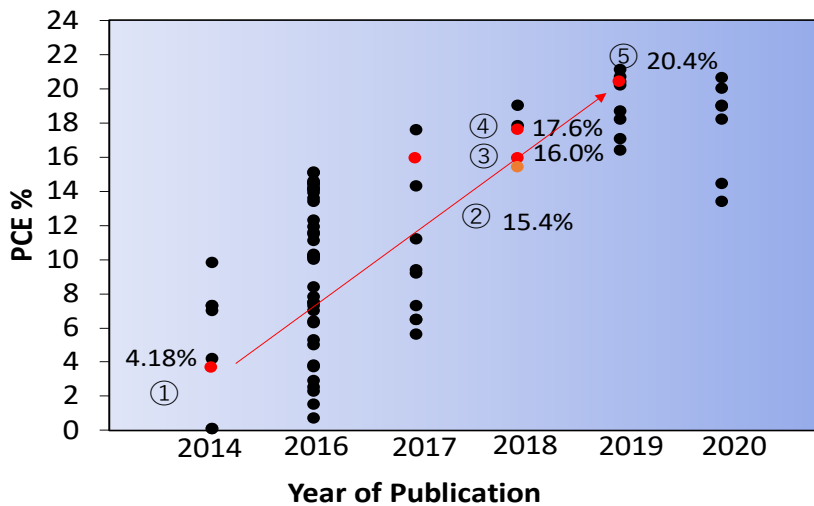
1. 研究目標

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。本報告書では主に①、②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の目標として、本研究を発展させ、短絡電流 (J_{sc}) 34mA/cm²を目指す。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。今期目標として12%を目指す。

2. 研究成果

2-1 SnPb ペロブスカイト太陽電池

図1に赤外光エネルギー変換太陽電池の効率の推移を我々の結果を含めてまとめる。我々は2014年にSnPb混合金属ペロブスカイト太陽電池の発電性能を初めて報告したが、当初の効率は4.18%と低かった。当初はFTO/ETL/SnPbPVK/HTL/Au (PVK cell-1、光はFTO側から入射)の順構造でありJscは30mA/cm²程度と他の太陽電池と比較しても悪くはなかったが、Vocが0.2-0.3VでありVocのロス



- ① J. Phys. Chem. Lett. 2014, 5 (6), 1004–1011.
- ② The Journal of Physical Chemistry, Part C: 2018, 122 (48), 27284–27291
- ③ J. Phys. Chem. C 2018, 122 (48), 27284–27291
- ④ Nano Lett. 2018, 18(6), 3600–3607
- ⑤ ACS Energy Lett., 2019, 4, 1991–1998

図1 SnPb ペロブスカイト太陽電池効率の世界動向と我々の研究グループの研究成果

① → ② 逆構造の導入、② → ③ 結晶欠陥の減少、③ → ④ スパイク構造導入、④ → ⑤ 透明導電膜と結晶格子のひずみ完全

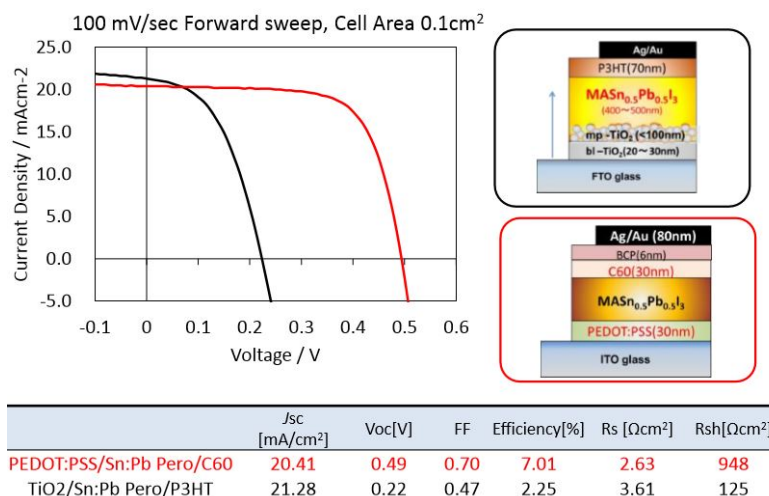


図2 順構造と逆構造の太陽電池性能の比較

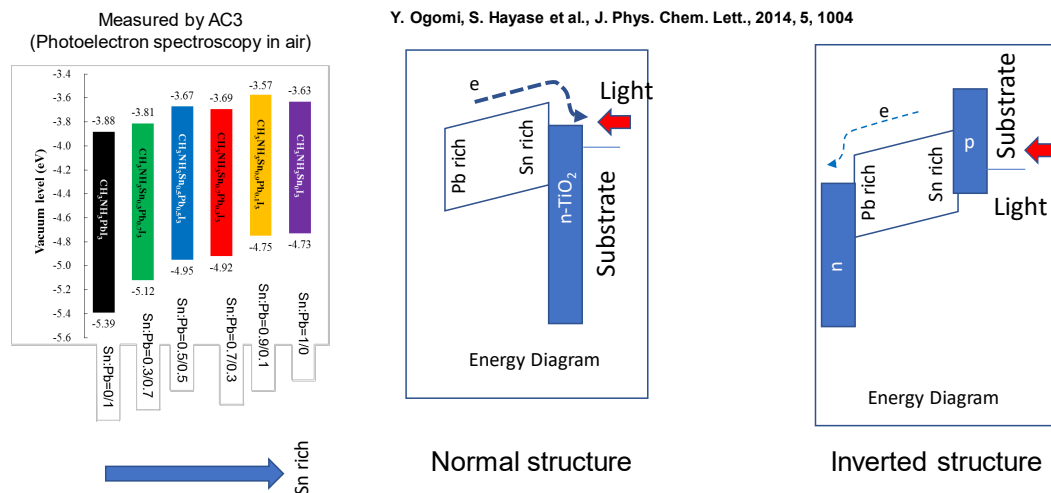


図3 Sn/Pb比が異なる傾斜構造とバンド構造

が0.8-1.0 V程度と非常に大きいという欠点があった。PVK cell-1のETLとしてポーラスチタニアを用いていたが、熱刺激電流法を用いたキャリアトラップの分布を調べたところ、チタニアとSnPbペロブスカイトの界面に多くのトラップが発生することがわかった。このため、チタニアとSnPbペロブスカイトが直接接触しないようにフラーレン層、金属酸化膜薄膜を挿入したところ、確かにVocは向上するが0.4 V程度であり、Vocのロスは依然大きかった。SnPbペロブスカイトとチタニア酸化膜の接

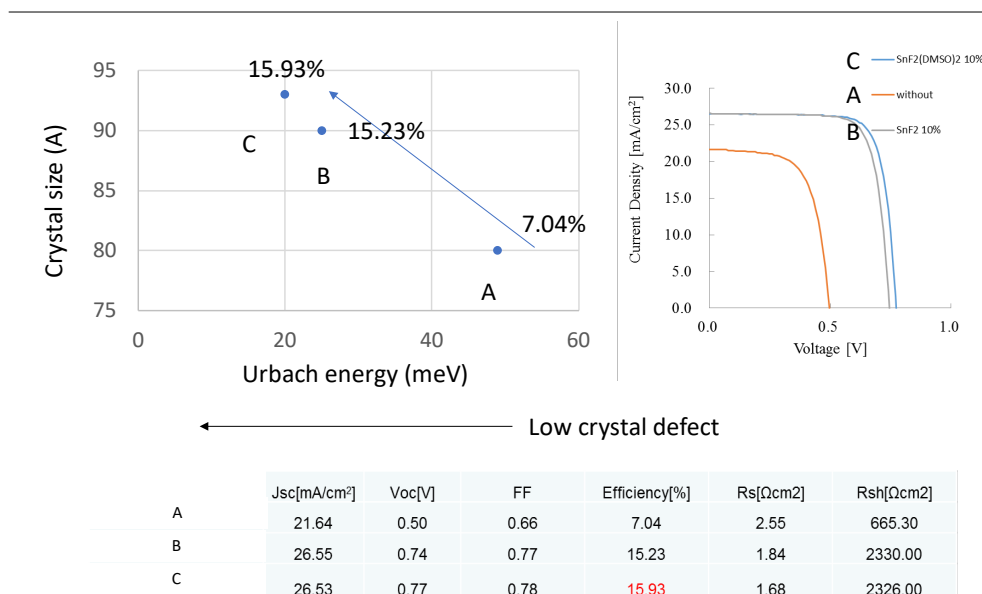


図4 SnF₂(DMSO)錯体添加による結晶性の向上

触を避けるためにITO/HTL/SnPbPVK/ETL/Ag/Au (PVK cell-2、光はITO側から入射)の逆構造セルを作製したところ図2に示す通り電圧は0.5Vになり、Vocのロスを0.7 eV程度に下げることができた。膜厚、プロセスの改善により、効率を15.4% (Voc:0.74V, Jsc:26.53mA/cm², FF:0.77)に向上することができた(図1②)。逆構造のほうが順構造よりも効率が高い理由として、酸化物半導体/Sn系ペ

ロブスカイト界面に形成される欠陥構造以外に SnPb ペロブスカイト層が Sn/Pb 比の異なる傾斜構造を持ち、図3に示すようにバンド構造が傾斜を持つことも考えられる。塗布層の上面では Sn/Pb 比が低く、下面ほど Sn/Pb 比が高くなっている。このため、逆構造では電荷が分離しやすい構造になっているが、順構造では電荷が分離しにくいバンド構造になっている。Sn 系ペロブスカイトの欠陥の一つ

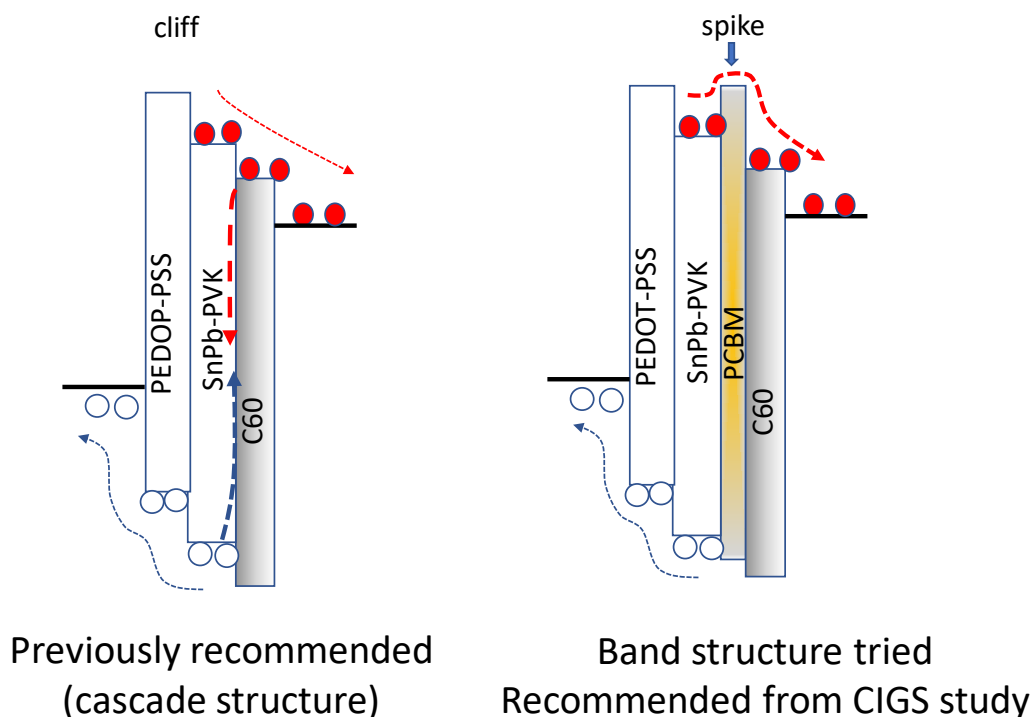


図5 クリフ構造とスパイク構造とその電荷分離

である Sn^{4+} の量を減らすこと、およびその粒界サイズを大きくするために、従来の SnF_2 の添加に代えて $\text{SnF}_2(\text{DMSO})$ 錯体を添加することにより図4に示す通り結晶サイズが大きくなり、 $V_{oc}:0.77\text{ V}$, $J_{sc}:26.53\text{ mA/cm}^2$, $\text{FF}:0.78$, $\text{Eff}:15.93$ まで効率が改善できた (図1③)。

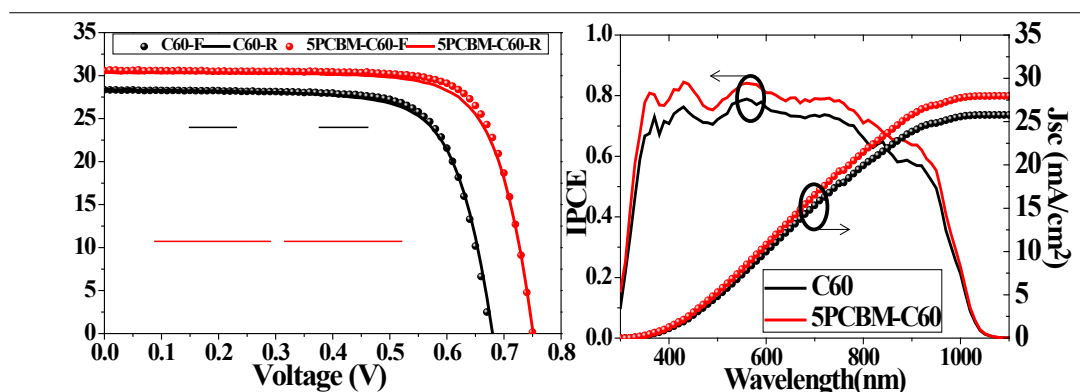


図6 スパイク構造とクリフ構造を有するペロブスカイト太陽電池の効率比較

図1③から④への効率の改良は図5に示すようにバンド構造に従来のカスケード型の電子構造(クリ

フ構造)ではなく、スパイク構造を導入することによって行った。本アイデアはCIGS太陽電池のバンド構造を模擬しており、塗布型ペロブスカイト太陽電池にスパイク型バンド構造を導入した初めての例である。SnPbペロブスカイト/電子輸送層界面で電荷再結合を防止できるスパイクバンド構造が、

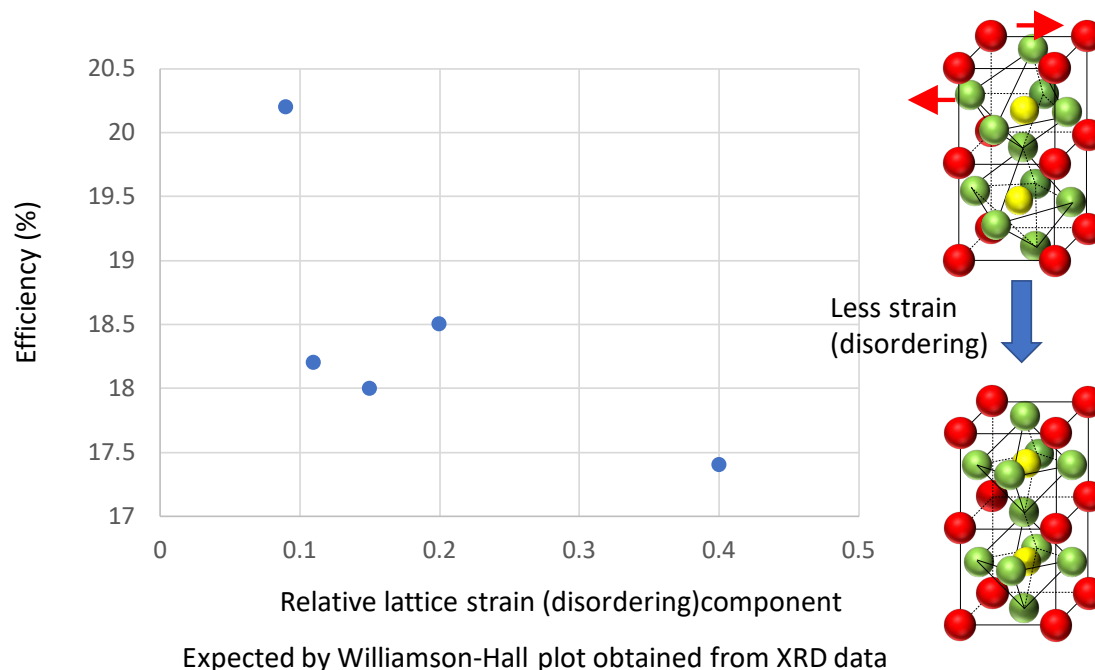


図7 結晶の格子ひずみと効率の関係

クリフバンド構造よりも高い効率を示すことを実証できた。図6に示す通りスパイク構造のVocはクリフ構造に比較し相対的に0.08V向上した。

図1の④から⑤への効率向上は透明導電膜をITOからFTOへ、および結晶格子のひずみを低下させることにより行った。ASnPbX3構造のA構造を変えることにより結晶のひずみを低下させた。図7に

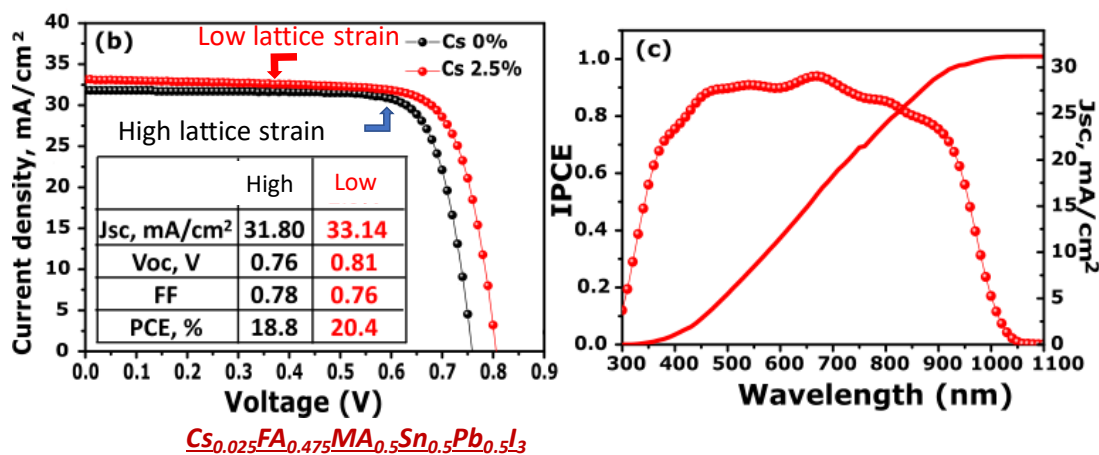
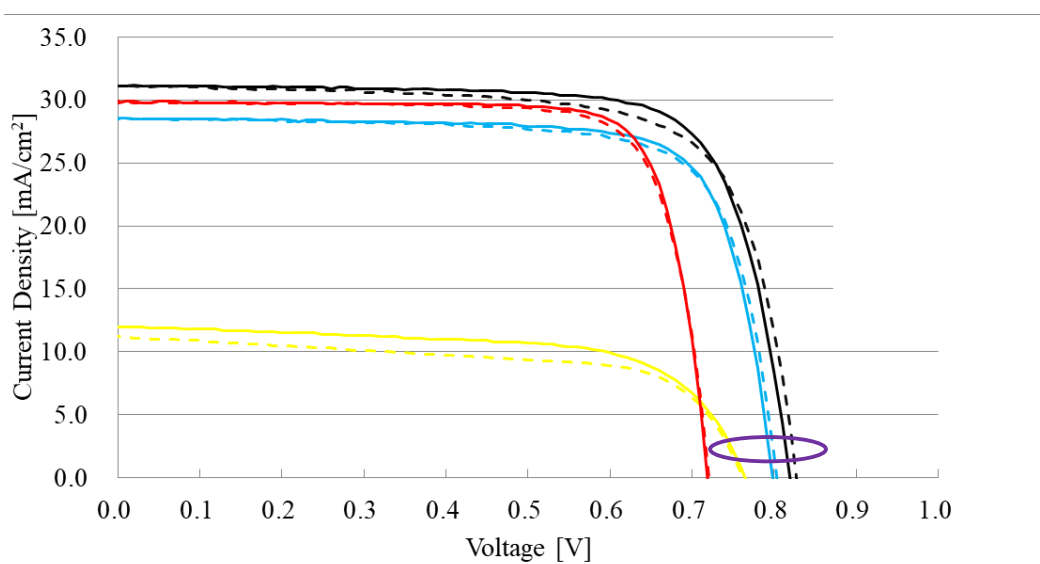


図8 結晶ひずみを低下させた太陽電池の特性

表1 太陽電池性能推移の詳細 (①から⑤は図1を参照のこと)

	Jsc /mA/cm ²	Voc/V	FF	Eff /%	Voc loss /V	Jsc loss /mA/cm ²	Vand gap/eV	Ideal Jsc /mA/cm ²
①	20.04	0.42	0.5	4.18	0.76	20.96(51%)	1.18	41
②	26.55	0.74	0.77	15.23	0.44	14.45 (35%)	1.18	41
③	26.53	0.77	0.78	15.59	0.41	14.47 (35%)	1.18	41
④	30.56	0.75	0.76	17.59	0.43	10.4(25%)	1.18	41
⑤	33.14	0.81	0.76	20.4	0.37	7.86(19%)	1.18	41

はXRDから計算した結晶のひずみと効率の関係を示す。相対的な結晶ひずみが低いほど効率が高くなった。結晶のひずみはキャリア挙動に関係し、ひずみが小さいほどキャリア寿命が長く、キャリア移動度が高いことが分かった。効率は図8に示すように20.4%(Voc:0.77V, Jsc:26.53 mA/cm², FF:0.78)ま



PCE[%]	19.33	18.68	17.57	17.29	5.96	5.41	17.12	16.79
FF	0.76	0.73	0.77	0.75	0.65	0.64	0.80	0.78
Voc[V]	0.82	0.83	0.80	0.80	0.76	0.76	0.72	0.72
Jsc[mA/cm ²]	31.07	31.11	28.60	28.53	12.01	11.18	29.80	29.86

図9 ペロブスカイト表面パッシベーションによる粒界、ヘテロ界面の欠陥密度低減による効率向上

で効率を向上することができた。表1に太陽電池効率の推移を示す。Vocの向上は逆構造を用いたことおよび格子ひずみを低下させたことで大きな改善が見られた。Jscは逆構造、スパイクバンド構造の導入および格子ひずみ低減で大きな改善が認められた。VocのロスもPbペロブスカイト太陽電池の0.35-0.40eVと同じ程度にまで低下することができた。PbペロブスカイトとSnPbペロブスカイトのバンドギャップがそれぞれ1.55eV、1.2-1.42eVであり、計算では後者のほうが高い効率が期待できる。図9に示すように表面パッシベーションを行うことにより0.83Vの高電圧を達成することができた(Voc loss:0.35 eV)。この高電圧とVocのロスはPb-ペロブスカイトと同程度であり、これらの結果はSnPn-

ペロブスカイトが Pb-ペロブスカイトを凌駕する性能を有していることを示唆している。Jsc の向上は、800-1000nm 領域での EQE を向上させる必要がある。図 10 に示す通り絶対光電変換効率は 800-1000nm では 100%に近く、ペロブスカイト層での光吸収率の向上によって Jsc を向上させることが可

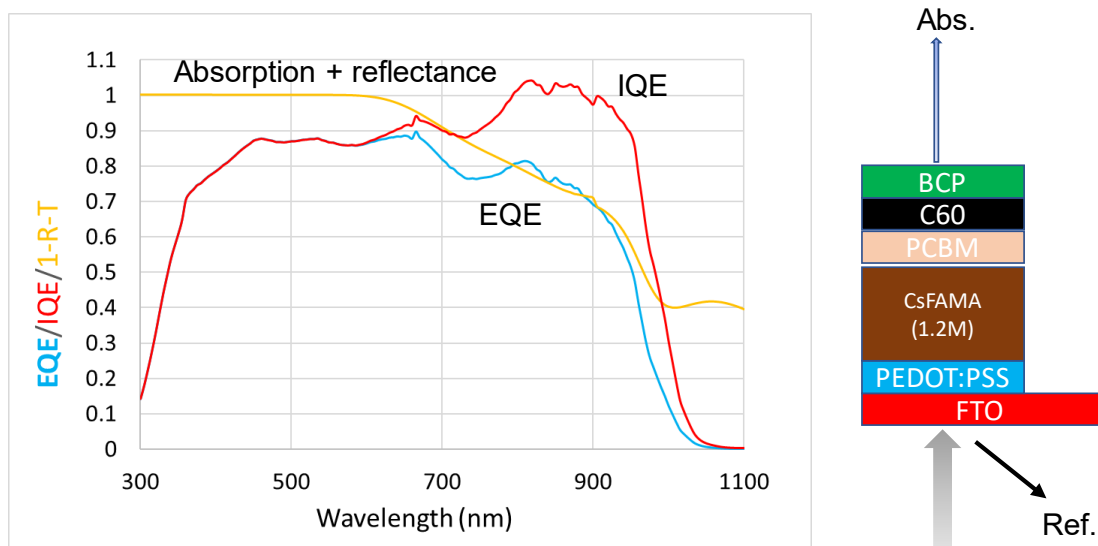


図 10 太陽電池の IQE (内部量子収率) と EQE(外部量子収率)

能である。反射防止膜を導入することによって、相対的に 1-2 mA/cm² の短絡電流向上が認められることが確認されている。膜厚、光反射率の計算により、光閉じ込め効果を向上させることにより、Jsc を

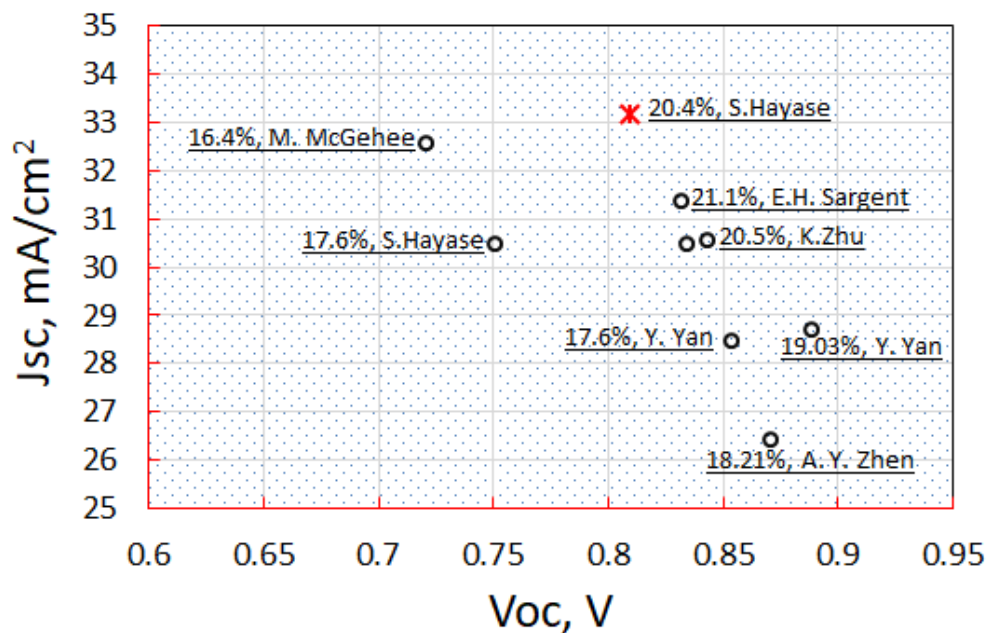


図 11 世界の赤外光電変換ペロブスカイト太陽電池と我々の太陽電池特性の位置づけ

さらに向上させることができると考えられる。計算によるとボトムセルに 1.2 eV のナローバンドギャップペロブスカイト太陽電池、トップセルに 1.8eV ワイドギャップペロブスカイト太陽電池を用いるとペロブスカイト/Si タンデム太陽電池と同じ 36%の効率が得られるという計算がある。SnPb ペロブスカイトのバンドギャップは 1.2eV 程度でありオールタンデムペロブスカイト太陽電池のボトムセルとしての応用が期待できる。

本研究の目標は 34 mA/cm² の高電流が発揮できるペロブスカイト太陽電池であるが、現在 33 mA/cm² の短絡電流が得られるまでに向上している。反射防止膜により 1-2 mA/cm² の向上が可能なことを確認しており、光閉じ込め効果による構造の最適化により達成できると考えられる。本研究の目標をほぼ達成できたと考える。図 1 1 に世界の赤外光電変換ペロブスカイト太陽電池と我々の太陽電池特性の位置づけを示す。J_{sc} に関してはトップである。

2-2 鉛を含まない Sn-ペロブスカイト太陽電池

ヨーロッパの Rohs directive によると電気製品に使う Pb は制限されており、Pb-free ペロブスカイトを光吸収層として用いる太陽電池が望まれている。多くの Pb-free PVK 太陽電池に関する論文が報告されているが効率が低いという問題点が残っている。それらの中でも SnPVK は比較的高い効率が報告されている。SnPVK に 2D 構造を部分的に導入した SnPVK 太陽電池で 9%程度の効率が報告されている。SnPVK の太陽電池の効率が低い原因として、 Sn^{2+} の欠損密度が高いこと、およびキャリア密度が太陽電池としては非常に高く、太陽電池として有効に働くキャリア密度($10^{15}/\text{cm}^3$)をはるかに超えて $10^{20}/\text{cm}^3$ に達するためである。この高いキャリア密度を低下させるため、 Sn^{2+} よりも酸化しやすくまたペロブスカイト構造の格子に取り込まれやすいイオンサイズを持った Ge^{2+} を添加したところ、 Sn^{4+} の含有量、キャリア密度が大きく低下することが分かった。また、ジアミノエチレンを用いてペロブスカイト表面の欠陥をパッシベーションすること、結晶格子ひずみを小さくすること、n層/PVK/p層のバンド構造をコン

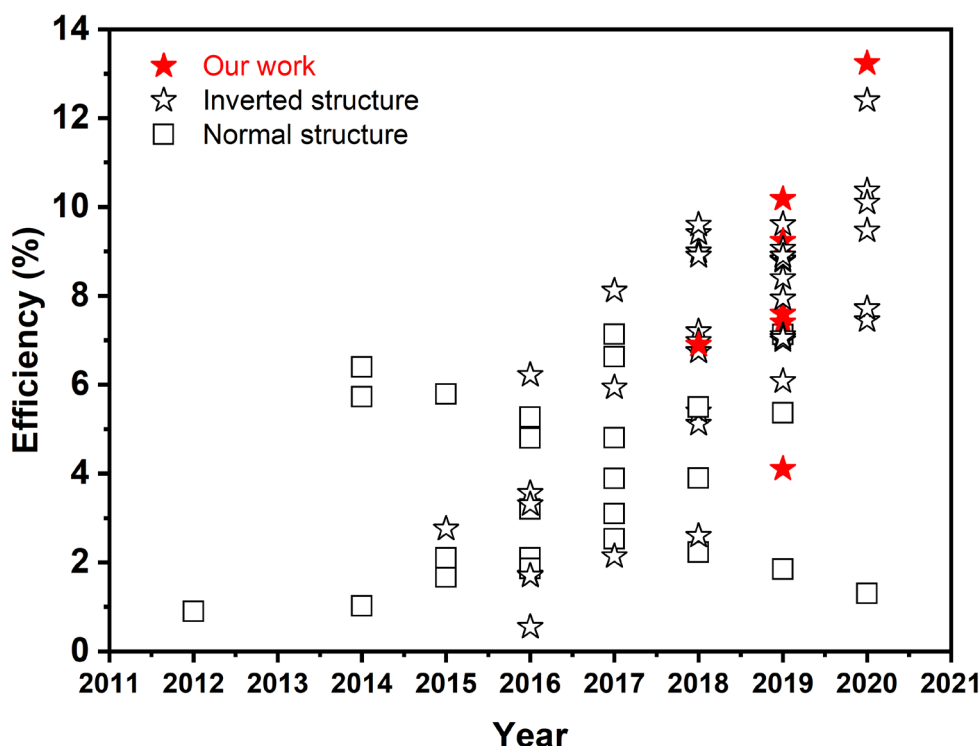


図 1.2 Sn-ペロブスカイト太陽電池の効率向上の推移 (大きな赤い★が我々の結果)

トロールすることにより、上記問題点を解決し、世界最高の 13.2%の効率を実現し、今年目標である 12%を達成した。図 1.2 に我々の結果を含めた Sn ペロブスカイト太陽電池の効率の推移を示す。熱刺激電流で測定したトラップ密度は Pb ペロブスカイトと同程度まで低下しており、1 ミクロンと長いキャリア移動距離からも、今後更なる高効率化が期待できる。太陽電池の Voc loss (光電変換時のエネルギーロスの目安) は 0.9 eV から 0.39 eV まで低下させることに成功した。この値は 2.5%の効率を有する Pb ペロブスカイト太陽電池の Voc loss の 0.3 eV に迫っており、Pb-PVK 太陽電池と同等、またそれを超える高効率を期待できることを強く示唆する。

3. 研究発表・講演、文献、特許等の状況

(1) 研究発表・講演

2019 年度

Gaurav Kapil, Takeru Bessho, Takumi Kinoshita, Qing Shen, Taro Toyoda, Takuro N. Murakami, Takashi Minemoto, Hiroshi Segawa, Shuzi Hayase: “Research pertaining to fabricate 20.4% efficient tin/lead perovskite solar cells”; presented at MRS 2019 Fall meeting and exhibit, Boston, Massachusetts, USA. Dec 1- Dec 6, 2019.

Gaurav Kapil, Takeru Bessho, Takumi Kinoshita, Qing Shen, Taro Toyoda, Takuro N. Murakami, Takashi Minemoto, Hiroshi Segawa, Shuzi Hayase: “Research to obtain high efficiency in tin-lead perovskite solar cells”; presented at 80th JSAP Autumn Meeting, Sapporo, Japan. September 18-September 21, 2019.

Gaurav Kapil, Takeru Bessho, Takumi Kinoshita, Qing Shen, Taro Toyoda, Takashi Minemoto, Takuro N. Murakami, Hiroshi Segawa, Shuzi Hayase: “Strain engineering in tin-lead perovskite solar cells to improve the power conversion efficiency Reduced strain by cesium addition leading to the improvement in the efficiency of tin-lead mixed perovskite solar cells”; presented at 16th Next-generation solar power generation system Symposium, Miyazaki, Japan. July 5- July 6, 2019.

Shuzi Hayase, Recent progress on narrow band gap perovskite solar cells, IEEE ICASI,2019 IEEE International Conference on Applied System Innovation, Kitakyushu, 2019/4/12

S. Hayase, Wide and narrow gap perovskite solar cells, ICoPP2019, 2019/5/24, Incheon, Korea.

S. Hayase, Expected innovative materials for printable solar cells, Lecture、China, Hangzhou, 2019/5/14, China Jiliang University.

S. Hayase, Wide and Narrow bandgap perovskite solar cells, SISF2019, 2019/6/21, Seoul.

早瀬修二 第236回 JOEM 研究会 有機エレクトロニクス of ランドスケープ 有機太陽電池の進展と将来展望 2019/12/10

S. Hayase, A. Kamarudin, G. Kapil, Ng, Huey, N. Nishimura, T. Ripolles, K. Hamada, Y. Ogomi, F. Yang, S. Iikubo, K. Kinoshita, K. Bessho, H. Segawa, S. Qing, K. Yoshino, T. Minemoto, Pb Free and Pb Less Perovskite Solar Cells with Narrow, Band Gap- Aiming at High Efficiency and All Perovskite Tandem Solar Cells, EU-PVSEC 9/11/2019.

S. Hayase, Sn-Perovskite Solar Cells with Narrow Gap- Toward Tandem and Pb free Perovskite Solar Cells, PVSEC-28, 11/8/2019, Xian, China.

Shuzi Hayase, Perovskite solar cells with narrow band gap or wide band gap -Toward tandem and Pb free perovskite Solar Cells-, The 8th LIA NextPV International Workshop 11/19/2019, Tokyo, Japan

Sjuzi Hayase, Narrow Band Gap Perovskite Solar Cells Containing Sn, MRS Fall conference, 12/7/2019 Boston.

早瀬修二、全タンデムペロブスカイト太陽電池の開発研究に向けて、ヨウ素学会 CIRIC セミナー、2020/2/19.

(2) 文献

2019 年度論文

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.

Ajay Kumar Baranwal, Shrikant Saini, Zhen Wang, Koji Hamada, Daisuke Hirotsu, Kohei Nishimura, Muhammad Akmal Kamarudin, Gaurav Kapil, Tomohide Yabuki, Satoshi Iikubo, Qing Shen, Koji Miyazaki, Shuzi Hayase, Effect of precursor solution aging on the thermoelectric performance of CsSnI₃ thin film, DOI: 10.1007/s11664-019-07846-8, *Journal of Electronic Materials* (Springer USA).

Ajay Kumar Baranwal, Shrikant Saini, Zhen Wang, Daisuke Hirotsu, Tomohide Yabuki, Koji Miyazaki, Shuzi Hayase, Interface engineering using Y₂O₃ scaffold to enhance the thermoelectric performance of CsSnI₃ thin film, *Organic Electronics* (Elsevier), 2020, 76, 105488.

Takashi Minemoto, Yu Kawano, Takahito Nishimura, Qing Shen, Kenji Yoshino, Satoshi Iikubo, Shuzi Hayase, Jakapan Chantana, Theoretical analysis of band alignment at back junction in Sn-Ge perovskite solar cells with inverted p-i-n structure, *SOLMAT*, 10.1016/j.solmat.2019.110208.

Muhammad Akmal Kamarudin, Daisuke Hirotsu, Zhen Wang, Kengo Hamada, Kohei Nishimura, Qing Shen, Taro Toyoda, Satoshi Iikubo, Takashi Minemoto, Kenji Yoshino, Shuzi Hayase, Suppression of Charge Carrier Recombination in Lead-Free Tin Halide Perovskite via Lewis Base Post-Treatment, *J. Phys. Chem. Lett.* 2019, 10, 17, 5277-5283, DOI:10.1021/acs.jpcclett.9b02024, 2019.

Fan Zhang, Qinxun Huang, Jun Song, Yaohong Zhang, Chao Ding, Feng Liu, Dong Liu, Xiaobin Li, Hironobu Yasuda, Koji Yoshida, Junle Qu, Shuzi Hayase, Taro Toyoda, Takashi Minemoto, and Qing Shen, Growth of Amorphous Passivation Layer Using Phenethylammonium Iodide for High-Performance Inverted Perovskite Solar Cells, *Sol. RRL* 2019, 1900243, 1900243 (1 of 8).

Kohei Nishimura, Daisuke Hirotsu, Muhammad Akmal Kamarudin, Qing Shen, Taro Toyoda, Satoshi

likubo, Takashi Minemoto, Kenji Yoshino, Shuzi Hayase, Relationship between Lattice Strain and Efficiency for Sn-perovskite Solar Cells, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2019, 11, 34, 31105-31110.

11.

Kengo Hamada, Daisuke Hirotani, Muhammad Akmal Kamarudin, Kohei Nishimura, Qing Shen, Satoshi likubo, Takashi Minemoto, Kenji Yoshino, Taro Toyoda, and Shuzi Hayase, Pb-free Sn perovskite solar cells doped with Samarium iodide, Chem. Lett., <https://doi.org/10.1246/cl.190163>, 48, 836-839, 2019.

Manish, Pandey, Zhen Wang, Gaurav Kapil, Ajay Baranwal, Daisuke Hirotani, Kengo Hamada, Shuzi Hayase, Dependence of ITO-coated flexible substrates in the performance and bending durability of perovskite solar cells" (Full Paper, No. adem.201900288) to Advanced Engineering Materials, 2019, 1900288 DOI:10.1002/adem.20190028.

Munish Pandey, Gaurav Kapil, Kazuhiko Sakamoto, Daisuke Hirotani, Akmal Kamarudin, Zhen Wang, Kengo Hamada, Daishiro Nomura, Hyo-Goung Kang, Hideaki Nagayoshi, Masaki, Nakamura, Masatoshi Hayashi, Takatoshi Nomura, and Shuzi Hayase, Efficient, Hysteresis Free, Inverted Planar Flexible Perovskite Solar Cells via Perovskite Engineering and Stability in Cylindrical Encapsulation, Sustainable Energy & Fuels, 2019, 3, 1739-1748, DOI:10.1039/c9se00153k.

Hiroji Hosokawa, Ryo Tamaki, Takuya Sawada, Akinori Okonogi, Haruyuki Sato, Yuhei Ogomi, Shuzi Hayase, Yoshitaka Okada & Toshihiro Yano, Solution-processed intermediate-band solar cells with lead sulfide quantum dots and lead halide perovskites, Nature Communications, 10, 43, (2019).

Keitaro Hamada, Kyosuke Yonezawa, Kohei Yamamoto, Tetsuya Taima, Shuzi Hayase, Noboru Ooyagi, Yuzo Yamamoto, and Keisuke Ohdaira, Vacuum deposition of CsPbI₃ layers on textured Si for Perovskite/Si tandem solar cells, Japanese Journal of Applied Physics 58, SBBF06, 2019.

Ng, C.H., Nishimura K., Ito N., Hamada, K., Hirotani, D., Yang, F., Wang Z., likubo, S., Shen, Q., Yoshino K., Minemoto, T., Hayase, S., Role of GeI₂ and SnF₂ Additives for SnGe Perovskite Solar Cells, Nano Energy, Volume 58, April 2019, 130-137, <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.026>, 2019.

Zhen Wang, Ajay K. Baranwal, Muhammad Akmal kamarudin, Putao Zhang, Gaurav Kapil, Tingli Ma, Shuzi Hayase, Delocalized Molecule Surface Electronic Modification for Enhanced Performance and High Environmental Stability of CsPbI₂Br Perovskite Solar Cells, Nano Energy, <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104180>

Gaurav Kapil, Takeru Bessho, Chi Huey Ng, Kengo Hamada, Manish Pandey, Muhammad Akmal Kamarudin, Daisuke Hirotani, Takumi Kinoshita, Takashi Minemoto, Qing Shen, Taro Toyoda, Takurou N. Murakami, Hiroshi Segawa, Shuzi Hayase, Strain Relaxation and Light Management in Tin-Lead Perovskite Solar Cells to Achieve High Efficiencies, ACS Energy Lett. 2019, 4, 8, 1991-1998. (IF:12.3) <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.9b01237>.

Zhen Wang, Ajay K. Baranwal, Muhammad Akmal Kamarudin, Chi Huey Ng, Manish Pandey, Tingli Ma,

Shuzi Hayase, Structured-Crystallization for Efficient All-Inorganic Perovskite Solar Cells with High Phase Stability, *J. Material Chemistry A*, 2019. 10.1039/C9TA05556H.

Zhen Wang, Muhammad Akmal Kamarudin, Ng Chi Huey, Fu Yang, Manish Pandey, Gaurav Kapil, Tingli Ma, Shuzi Hayase. Passivation of grain boundary by squaraine for defect passivation and efficient perovskite solar cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 11 (10),10012–10020, 2019.

Zhen Wang, Muhammad Akmal Kamarudin, Ng Chi Huey, Fu Yang, Manish Pandey, Gaurav Kapil, Tingli Ma, Shuzi Hayase. Interfacial sulfur functionalization anchoring SnO₂ and CH₃NH₃PbI₃ for enhanced stability and trap passivation in perovskite solar cells. *ChemSusChem.*, 23, 3941-3948, 2018.

Zhen Wang, Ajay K. Baranwal, Muhammad Akmal kamarudin, Chi Huey Ng, Manish Pandey, Tingli Ma, Shuzi Hayase, Xanthate-induced sulfur doped all-inorganic perovskite with superior phase stability and enhanced performance, *Nano Energy*, 59, 258-267, 2019.

Zhang, P., Yang, F., Kapil, G., Ng, C. H., Ma, T., Hayase, S., Preparation of Perovskite Films under Liquid Nitrogen Atmosphere for High Efficiency Perovskite Solar Cells, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 7, 3956-3961, 2019.

2.主要研究成果

2.7 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

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（インダルタ・クンコロ・アジ君）と研究生（ムハンマド・イルハム君）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について、実験と解析の両面から検討を進めた。

I. 2019年度計画概要

溶融塩炉（図1）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、図1に示すように、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。このため、2019年度は、フリーズプラグの動作特性の把握と高性能化を目的として、次の課題を実施した。

- 検証用実験データの取得と解析モデルの開発
- 塩の凝固・融解挙動に及ぼす壁面内熱移動と自然対流の影響把握
- 高性能フリーズプラグの提案

II. 研究実施状況

金属製の円筒容器内に形成した凝固塩の頂部に熱を加えたときの塩の融解過程を実験的に調べた。また、この状況を数値計算により解析した。実験データと解析結果の比較を図2に示す。本図より、次のことがわかる。

- 解析結果は実験結果とよく一致しており、用いた解析モデルは、塩の融解挙動を十分正確に再現できる。
- 温度上昇は、金属壁の近くでより早く生じる。これより、フリーズプラグが開となる上で、金属壁を経由して塩に供給される熱が重要な役割を果たすことがわかる。
- 融点に達する前後で、局所温度の急激な上昇が見られる。これより、液体塩内に形成される自然対流が、熱輸送を促進していると考えられる。

上記の結果より、壁効果と自然対流効果が顕著な影響を有するため、フリーズプラグが開となるまでのプロセスは単純な一次元問題として扱うことは出来ないことが明らかとなった。このため、金属壁の熱物性や厚さをパラメーターとして実験と数値解析を実施し、フリーズプラグの開時間に及ぼす壁効果の影響を系統的に明らかにした。また、自然対流の効果はフリーズプラグの設置角度の影響を強く受けることから、図3に示すように設置角度を様々に変更して、凝固・融解の状況を数値的に調べた。この結果、自然対流効果を最も有効に活用できることから、開時間を短縮する上では、水平配置が有利と考えられることを示した。

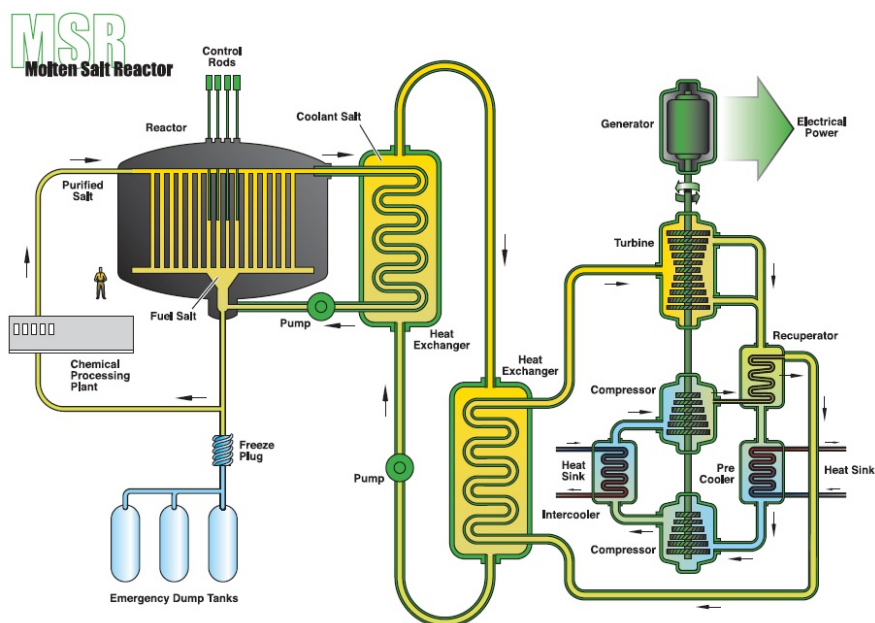


図1 第IV世代原子炉の一つである溶融塩炉の概略構造

(https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_40481/technology-roadmap)

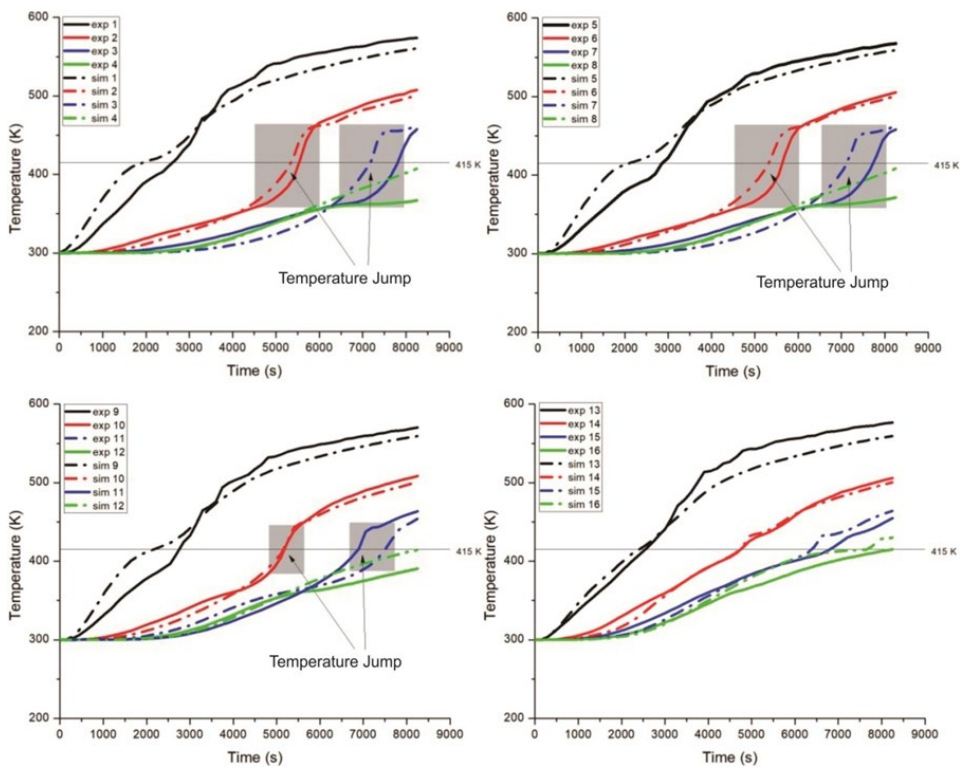
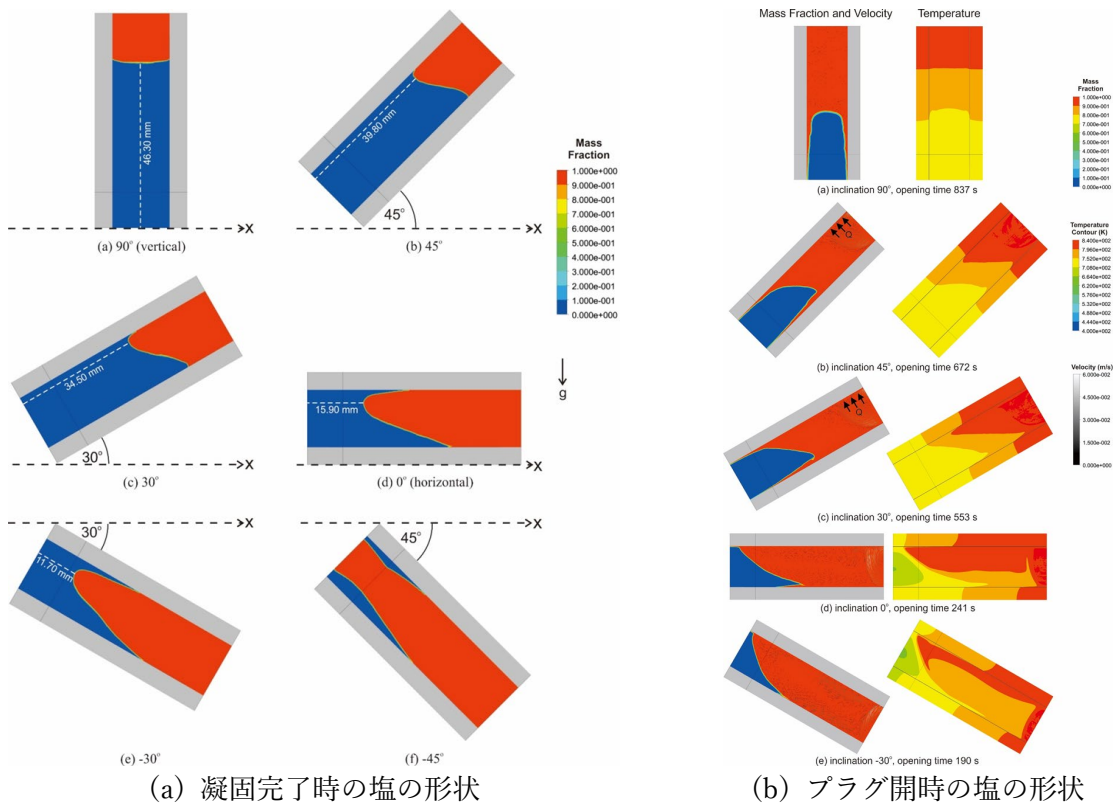


図2 凝固塩融解時の温度過渡に関する実験と解析の比較



(a) 凝固完了時の塩の形状

(b) プラグ開時の塩の形状

図3 塩の形状に及ぼすフリーズプラグの設置角度の影響

Ⅲ. 業績・成果一覧

(学術雑誌)

- K. Aji, T. Tokushima, M. Kinoshita, T. 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, Vol. 6, Paper No. 021304 (7 pages) (2019).

(国際会議)

- K. Aji, T. Tokushima, K. Enoki, M. Kinoshita, T. Okawa, Convection effect of the freeze valve melting process on molten salt reactor, Proceedings of 27th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE27), Tsukuba, Ibaraki, May 19-24, Paper No. ICONE27-1346 (2019).
- T. Tokushima, I. K. Aji, K. Enoki, M. Kinoshita, T. Okawa, An experimental study of the freeze valve opening time with considering wall effect, Proceedings of 27th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE27), ICONE27-1519 (2019).

(特許)

- 大川富雄, インダルタ・クンコロ・アジ, 木下幹康, 吉岡律夫, フリーズバルブ・原子炉・および太陽熱発電装置, 特願 2019-092316.

IV. 2020 年度の方針と計画

溶融塩炉フリーズプラグの高精度評価と高性能化を目的として、2020 年度は以下を実施する。

- 塩の凝固・融解過程における壁効果と自然対流効果の詳細検討（実験・解析）
- 高熱伝導材料を用いたフリーズプラグ開時間短縮技術の開発
- 凍結塩・固体面付着力の評価と強度向上手法の開発

3. 活動一覧

3.1. 外部発表

iPERC 教員が関連する 2019 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
69	35	97	7	3	19

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 2 件

- ・“バーチャルグリッドハブポートユニット，バーチャルグリッド制御装置，バーチャルグリッドシステム，プログラム”
- ・大川富雄，インダルタ・クンコロ・アジ，木下幹康，吉岡律夫，フリーズバルブ・原子炉・および太陽熱発電装置，特願 2019-092316.

特許取得件数 2 件

- ・“蓄電池管理システム，蓄電池情報サーバ，充放電制御装置及び蓄電池，特許第6555714号（2019/7/19）

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。

2019 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	14 件	8 件	1 件	2 件	25 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 の産学連携実績の合計の件数は 32 件である。研究テーマの一覧は 3.5 に掲載。

2019 年度分のみ

	科研費研究	産学官連携	合計
実施件数	7 件	25 件	32 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》

- 「超高効率・低コスト III-V 化合物太陽電池モジュールの研究開発」曾我部東馬
- 「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
- 「太陽光発電量予測における機械学習に関する基礎研究」曾我部東馬
- 「機械学習を用いた半導体搬送システムにおける目的地到着時刻の予測」曾我部東馬
- 「ペロブスカイト太陽電池の鉛低減技術に関する共同研究」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
- 「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発/革新的新構造太陽電池の研究開発/ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発（新素材と新構造による高性能化技術の開発）/高電流材料技術」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
- 「錫ペロブスカイト光電変換素子の発電阻害機構解明とナノヘテロ界面構築による高効率化」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・高耐久性化」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》

- 「リチウムイオン電池に関する、劣化要因及び運用条件を考慮した統計的容量劣化予測の誤差要因の研究」横川慎二

「パワー半導体の信頼性におけるスクリーニング技術と予測に関する数理モデルの研究」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
「エネルギーバーチャルグリッドシステムに関する共同研究」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

《制御系セキュリティ》

「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)」澤田賢治
「システムモデルを利用した攻撃検知技術に関する研究」澤田賢治
「制御システムのレジリエンスを向上させる協調型制御状態切り替え方式の検討」澤田賢治
「スマートインバータシステムに対するセキュリティ検証基盤の構築に関わる研究」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。

2019.8.2 電気通信大学 iPERC シンポジウム 2019

「革新的次世代太陽電池の大学での研究と企業実用化の動向」と題し、iPERC 主催のシンポジウムを開催した。基調講演は、東京大学総合文化研究科兼先端科学技術研究センター瀬川浩司教授による「再生可能エネルギーの主役に躍り出た太陽光発電とその新技術」について、招待講演は、株式会社東芝研究開発センタートランスデューサ技術ラボラトリー都鳥頭司氏による「フィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールの開発」について、及び弊学沈青教授による「量子ドット太陽電池の電荷分離界面の構築と高効率化への道筋」、早瀬修二特任教授による「さらに高い効率を狙えるペロブスカイト太陽電池」についての講演が実施された。

3.7 表彰

1. 澤田賢治准教授が"電磁比例弁内のスプールに作用するクーロン摩擦力に起因した不安定振動の解析と安定化させるための設計法"において 2019 年度 FA 財団論文賞を受賞.
2. 崎山一男教授が電子情報通信学会において星野翔, 椎名瞭, 松村竜我, **崎山一男**, "レーザー光を使った音情報の漏洩に対する安全性評価"学術奨励賞を受賞.
3. 木寺正平准教授が"Multi-frequency Integration Algorithm of Contrast Source Inversion Method for Microwave Breast Tumor Detection"において、IEEE EMBC 2019, Student Paper Competition, Open Finalist (Top 15)を受賞.
4. 木寺正平准教授が"Iterative Data Clustering Algorithm of Doppler-Associated RPM Imaging for UWB Human Body Imaging Radar"において、PIERS 2019 Rome, Student Paper Competition, Honorable Mention (Top 5)を受賞.

4. 外部発表一覧(2019.4~2020.3)

4.1. 【一般論文】

1. R. Suzuki, K. Terada, K. Sakamoto, **T. Sogabe** and **K. Yamaguchi** : “ Low Sunlight Concentration Properties of InAs Ultrahigh-Density Quantum-Dot Solar Cells”, Jpn. J. Appl. Phys., 58, (2019) pp.071004 1-7.
2. R. Sugiyama, S. Tatsugi, **T. Sogabe** and **K. Yamaguchi** : “Optical Transition and Carrier Relaxation in a Type-II InAs/GaAsSb Quantum Dot Layer”, Jpn. J. Appl. Phys., 58, (2019) pp.012004 1-5.
3. 佐倉衛, 澤田賢治, 金子修, 新誠一, 松田功, 村上徹; “エネルギー保存則に基づく複合物理領域モデルの検証”, 電気学会論文誌 C, 139/ 11, 1293-1303 (2019).
4. 澤田賢治, 濱田吉郎, 福永秀樹, 新誠一; “Generic Transport Model を用いた航空機の縦運動に関する最悪外乱の一解析”, システム制御情報学会論文集, 139/ 11, 1293-1303 32/ 8, 309-317(2019).
5. 武田健吾, 澤田賢治, 横川慎二, 新誠一; “グラフ列挙による風力・太陽光・蓄電池複合システムの重複グルーピング最適化”, 電気学会論文誌 C, 139/ 7, 786-795 (2019).
6. Yoshiki Nagatani, **Kenji Sawada**, **Seiichi Shin**; “Self-Triggered Optimal Control Based on Path Search Algorithm”, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 12/ 03, 85-93 (2019).
7. **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). <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab7f1f>
8. Linghan Chen, Daisuke Ando, Yuji Sutou, **Shinji Yokogawa**, and Junichi Koike; "Liner- and barrier-free NiAl metallization: A perspective from TDDB reliability and interface status," Applied Surface Science, Vol. 497, pp. 143810-1-5 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143810>
9. Kazuyuki Suzuki and **Shinji Yokogawa**; "Seven View Points and Reliability Engineering Scheme for Preventing Reliability Problems," International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, pp.2050006-1-17 (2020). <http://dx.doi.org/10.1142/S0218539320500060>
10. Kyosuke Kunii, Shun Endo, and **Shinji Yokogawa**; "Bayesian inference of lifetime distribution parameter on the time-dependent dielectric breakdown with clustering defects", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 58, No. SH, SHHG02 (2019). <https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab1fd6>
11. Jin Mitsugi, Yuusuke Kawakita, Kiyoshi Egawa, **Haruhisa Ichikawa**, “Perfectly Synchronized Streaming From Multiple Digitally Modulated Backscatter Sensor Tags,” IEEE Journal of Radio Frequency Identification, Vol. 3, No.3, pp.149-156, September 2019. DOI:10.1109/JRFID.2019.2914246
12. 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.
13. Ajay Kumar Baranwal, Shrikant Saini, Zhen Wang, Koji Hamada, Daisuke Hirotsu, Kohei Nishimura, Muhammad Akmal Kamarudin, Gaurav Kapil, Tomohide Yabuki, Satoshi Iikubo, **Qing Shen**, Koji

- Miyazaki, **Shuzi Hayase**, Effect of precursor solution aging on the thermoelectric performance of CsSnI₃ thin film, DOI: 10.1007/s11664-019-07846-8, Journal of Electronic Materials (Springer USA).
14. Ajay Kumar Baranwal, Shrikant Saini, Zhen Wang, Daisuke Hirotsu, Tomohide Yabuki, Koji Miyazaki, **Shuzi Hayase**, Interface engineering using Y₂O₃ scaffold to enhance the thermoelectric performance of CsSnI₃ thin film, Organic Electronics (Elsevier), 2020, 76, 105488.
 15. Takashi Minemoto, Yu Kawano, Takahito Nishimura, **Qing Shen**, Kenji Yoshino, Satoshi Iikubo, **Shuzi Hayase**, Jakapan Chantana, Theoretical analysis of band alignment at back junction in Sn-Ge perovskite solar cells with inverted p-i-n structure, SOLMAT, 10.1016/j.solmat.2019.110208.
 16. Muhammad Almal Kamarudin, Daisuke Hirotsu, Zhen Wang, Kengo Hamada, Kohei Nishimura, **Qing Shen**, Taro Toyoda, Satoshi Iikubo, Takeshi Minemoto, Kenji Yoshino, **Shuzi Hayase**, Suppression of Charge Carrier Recombination in Lead-Free Tin Halide Perovskite via Lewis Base Post-Treatment, J. Phys. Chem. Lett. 2019, 10, 17, 5277-5283, DOI:10.1021/acs.jpcclett.9b02024, 2019.
 17. Fan Zhang, Qinxun Huang, Jun Song, Yaohong Zhang, Chao Ding, Feng Liu, Dong Liu, Xiaobin Li, Hironobu Yasuda, Koji Yoshida, Junle Qu, **Shuzi Hayase**, Taro Toyoda, Takashi Minemoto, and **Qing Shen**, Growth of Amorphous Passivation Layer Using Phenethylammonium Iodide for High-Performance Inverted Perovskite Solar Cells, Sol. RRL 2019, 1900243, 1900243 (1 of 8).
 18. Kohei Nishimura, Daisuke Hirotsu, Muhammad Akmal Kamarudin, **Qing Shen**, Taro Toyoda, Satoshi Iikubo, Takashi Minemoto, Kenji Yoshino, **Shuzi Hayase**, Relationship between Lattice Strain and Efficiency for Sn-perovskite Solar Cells, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2019, 11, 34, 31105-31110.
 19. Kengo Hamada, Daisuke Hirotsu, Muhammad Akmal Kamarudin, Kohei Nishimura, **Qing Shen**, Satoshi Iikubo, Takashi Minemoto, Kenji Yoshino, Taro Toyoda, and **Shuzi Hayase**, Pb-free Sn perovskite solar cells doped with Samarium iodide, Chem. Lett., <https://doi.org/10.1246/cl.190163>, 48, 836-839, 2019.
 20. Manish, Pandey, Zhen Wang, Gaurav Kapil, Ajay Baranwal, Daisuke Hirotsu, Kengo Hamada, **Shuzi Hayase**, Dependence of ITO-coated flexible substrates in the performance and bending durability of perovskite solar cells" (Full Paper, No. adem.201900288) to Advanced Engineering Materials, 2019, 1900288 DOI:10.1002/adem.20190028.
 21. Munish Pandey, Gaurav Kapil, Kazuhiko Sakamoto, Daisuke Hirotsu, Akmal Kamarudin, Zhen Wang, Kengo Hamada, Daishiro Nomura, Hyo-Goung Kang, Hideaki Nagayoshi, Masaki, Nakamura, Masatoshi Hayashi, Takatoshi Nomura, and **Shuzi Hayase**, Efficient, Hysteresis Free, Inverted Planar Flexible Perovskite Solar Cells via Perovskite Engineering and Stability in Cylindrical Encapsulation, Sustainable Energy & Fuels, 2019, 3, 1739-1748, DOI:10.1039/c9se00153k.
 22. Hiroji Hosokawa, Ryo Tamaki, Takuya Sawada, Akinori Okonogi, Haruyuki Sato, Yuhei Ogomi, **Shuzi Hayase**, Yoshitaka Okada & Toshihiro Yano, Solution-processed intermediate-band solar cells with lead sulfide quantum dots and lead halide perovskites, Nature Communications, 10, 43, (2019).
 23. Keitaro Hamada, Kyosuke Yonezawa, Kohei Yamamoto, Tetsuya Taima, **Shuzi Hayase**, Noboru Ooyagi, Yuzo Yamamoto, and Keisuke Ohdaira, Vacuum deposition of CsPbI₃ layers on textured Si for Perovskite/Si tandem solar cells, Japanese Journal of Applied Physics 58, SBBF06, 2019.

24. Ng, C.H., Nishimura K., Ito N., Hamada, K., Hirotsu, D., Yang, F., Wang Z., Iikubo, S., Shen, Q., Yoshino K., Minemoto, T., **Hayase, S.**, Role of GeI₂ and SnF₂ Additives for SnGe Perovskite Solar Cells, *Nano Energy*, Volume 58, April 2019, 130-137, <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.026>, 2019.
25. Zhen Wang, Ajay K. Baranwal, Muhammad Akmal kamarudin, Putao Zhang, Gaurav Kapil, Tingli Ma, **Shuzi Hayase**, Delocalized Molecule Surface Electronic Modification for Enhanced Performance and High Environmental Stability of CsPbI₂Br Perovskite Solar Cells, *Nano Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104180>
26. Gaurav Kapil, Takeru Bessho, Chi Huey Ng, Kengo Hamada, Manish Pandey, Muhammad Akmal Kamarudin, Daisuke Hirotsu, Takumi Kinoshita, Takashi Minemoto, **Qing Shen**, Taro Toyoda, Takuro N. Murakami, Hiroshi Segawa, **Shuzi Hayase**, Strain Relaxation and Light Management in Tin–Lead Perovskite Solar Cells to Achieve High Efficiencies, *ACS Energy Lett.* 2019, 4, 8, 1991-1998. (IF:12.3)
27. Zhen Wang, Ajay K. Baranwal, Muhammad Akmal Kamarudin, Chi Huey Ng, Manish Pandey, Tingli Ma, **Shuzi Hayase**, Structured-Crystallization for Efficient All-Inorganic Perovskite Solar Cells with High Phase Stability, *J. Material Chemistry A*, 2019. 10.1039/C9TA05556H.
28. Zhen Wang, Muhammad Akmal Kamarudin, Ng Chi Huey, Fu Yang, Manish Pandey, Gaurav Kapil, Tingli Ma, **Shuzi Hayase**. Passivation of grain boundary by squaraine for defect passivation and efficient perovskite solar cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 11 (10), 10012–10020, 2019.
29. Zhen Wang, Muhammad Akmal Kamarudin, Ng Chi Huey, Fu Yang, Manish Pandey, Gaurav Kapil, Tingli Ma, **Shuzi Hayase**. Interfacial sulfur functionalization anchoring SnO₂ and CH₃NH₃PbI₃ for enhanced stability and trap passivation in perovskite solar cells. *ChemSusChem.*, 23, 3941-3948, 2018.
30. Zhen Wang, Ajay K. Baranwal, Muhammad Akmal kamarudin, Chi Huey Ng, Manish Pandey, Tingli Ma, **Shuzi Hayase**, Xanthate-induced sulfur doped all-inorganic perovskite with superior phase stability and enhanced performance, *Nano Energy*, 59, 258-267, 2019.
31. Zhang, P., Yang, F., Kapil, G., Ng, C. H., Ma, T., **Hayase, S.**, Preparation of Perovskite Films under Liquid Nitrogen Atmosphere for High Efficiency Perovskite Solar Cells, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 7, 3956-3961, 2019.
32. K. Aji, T. Tokushima, M. Kinoshita, **T. 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*, Vol. 6, Paper No. 021304 (7 pages) (2019).
33. Thuy-Linh Nguyen, Yasuo Sato and **Koichiro Ishibashi**; "A 2.77 μ W Ambient RF Energy Harvesting Using DTMOS Cross-Coupled Rectifier on 65 nm SOTB and Wide Bandwidth System Design," *MDPI Journal Electronics*, (2019)
34. Kohei Matsuda, Sho Tada, Makoto Nagata, Yuichi Komano, Yang Li, Takeshi Sugawara, Mitsugu Iwamoto, Kazuo Ohta, **Kazuo Sakiyama**, and Noriyuki Miura; "An IC-level countermeasure against laser fault injection attack by information leakage sensing based on laser-induced opto-electric bulk current density" *Japanese Journal of Applied Physics (JJAP)*, Vol. 497, pp. 143810-1-5 (2019).
35. **Kazuo Sakiyama**, Tatsuya Fujii, Kohei Matsuda, and Noriyuki Miura; "Flush Code Eraser: Fast Attack

- Response to Invalidate Cryptographic Sensitive Data"IEEE Embedded Systems Letters, (2019).
36. Akiko Toh, Yang Li, **Kazuo Sakiyama**, and Takeshi Sugawara; "Fingerprinting Light Emitting Diodes Using Spectrometer" IET Electronics Letters, 55/ 24, 1295-1297, (2019).
 37. Takeshi Sugawara, Natsu Shoji, **Kazuo Sakiyama**, Kohei Matsuda, Noriyuki Miura, and Makoto Nagata; "Side-Channel Leakage from Sensor-Based Countermeasures against Fault Injection Attack" Microelectronics Journal, 90, 63-71, (2019).
 38. Takeshi Sugawara, **Kazuo Sakiyama**, Shohei Nashimoto, Daisuke Suzuki, Tomoyuki Nagatsuka; "Oscillator without a Combinatorial Loop and its Threat to FPGA in Data Center" IET Electronics Letters, 55/ 11, 640-642, (2019).
 39. Takeshi Sugawara, Yang Li, and **Kazuo Sakiyama**; "Probing Attack of Share-Serial Threshold Implementation of AES" IET Electronics Letters, 55/ 9, 517-519, (2019).
 40. A. Makaino, Y. Tanaka and **K. Yamaguchi**; "Molecular Beam Deposition of High-Density InAs Quantum Dots on SiO_x Films" Jpn. J. Appl. Phys., 58, pp.SDDF07 1.- pp.SDDF07 4.(2019).
 41. A. Makaino, Y. Tanaka and **K. Yamaguchi**; "Molecular Beam Deposition of High-Density InAs Quantum Dots on SiO_x Films" Jpn. J. Appl. Phys., 58, SDDF07 1-SDDF07 4.(2019).
 42. 池崎太一, **金子修**; "Virtual Internal Model Tuning による二自由度制御系のデータ駆動型更新", 計測自動制御学会論文集, 56/ 3, 98-105 (2020).
 43. 浅井徹, 山川雅文, 奥田真由, 津田和呂, **金子修**, 岸真友, 東俊一, 有泉亮; "設備診断のための初期状態・入力・パラメータ同時推手法", 鉄と鋼, 106/ 2, 80-90 (2019).
 44. 池崎太一, **金子修**; "閉ループ系出力データに基づく制御器パラメータチューニングの新しいアプローチ-Virtual Internal Model Tuning の提案-", 電気学会論文誌 C, 139/ 7, 786-795 (2019).
 45. 高橋英輔, **金子修**; "一組の実験データを直接用いた閉ループ系の応答予測の新しいアプローチ", 電気学会論文誌 C, 55/ 4, 324-330 (2019).
 46. 高橋英輔, **金子修**; "一回の実験データを用いたセミクロード制御方式に対する制御器パラメータチューニング", 電気学会論文誌 C, 139/ 4, 395-401 (2019).
 47. Kengo Hamada, Ryo Tanaka, Muhammad Akmal Kamarudin, **Qing Shen**, Satoshi Iikubo, Takashi Minemoto, Kenji Yoshino, Taro Toyoda, Tingli Ma, Dong-won Kang, Shuzi Hayase; "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).
 48. Wentao Song, Yiming Wang, Bing Wang, Yingfang Yao, Wenguang Wang, Jinhui Wu, **Qing Shen**, Wenjun Luo, Zhigang Zou; "Super stable CsPbBr₃@SiO₂ tumor imaging reagent by stress-response encapsulation", Nano Research, (2020).
 49. 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).
 50. Zhoujie Chen, Yangguang Hu, Jin Wang, **Qing Shen**, Yaohong Zhang, Chao Ding, Yu Bai, Guocan Jiang, Zhengquan Li, Nikolai Gaponik; "Boosting Photocatalytic CO₂ Reduction on CsPbBr₃ Perovskite Nanocrystals by Immobilizing Metal Complexes", Chemistry of Materials, 32/ 4, 1517-1525,

(2020).

51. Feng Liu, Yaohong Zhang, Chao Ding, Kentaro Kawabata, Yasuha Yoshihara, Taro Toyoda, Shuzi Hayase, Takashi Minemoto, Ruixiang Wang, **Qing Shen**; "Triocetylphosphine Oxide Acts as Alkalest for $\text{SnX}_2/\text{PbX}_2$: A General Synthetic Route to Perovskite $\text{ASn}_x\text{Pb}_{1-x}\text{X}_3$ (A= Cs, FA, MA; X= Cl, Br, I) Quantum Dots", *Chemistry of Materials*, 32/ 3, 1089-1100, (2020).
52. Zhoujie Chen, Yangguang Hu, Jin Wang, **Qing Shen**, Yaohong Zhang, Chao Ding, Yu Bai, Guocan Jiang, Zhengquan Li, Nikolai Gaponik; "Boosting Photocatalytic CO_2 Reduction on CsPbBr_3 Perovskite Nanocrystals by Immobilizing Metal Complexes", *Chem. Mater.*, (2020).
53. Xing, M.; Zhang, Y.; **Shen, Q.**; Wang, R.; "Temperature dependent photovoltaic performance of TiO_2/PbS heterojunction quantum dot solar cells", *Solar Energy*, 195, 1-5, (2020).
54. Zhang, Y.; Wu, G.; Liu, F.; Ding, C.; Zou, Z.; **Shen, Q.**; "Photoexcited carrier dynamics in colloidal quantum dot solar cells: insights into individual quantum dots, quantum dot solid films and devices", *Chemical Society Reviews*, 49, 49-84, (2020).
55. 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 FAPbI_3 perovskite quantum dots/metal oxide heterojunctions used for stable perovskite quantum dot solar cells", *Nano Energy*, 67, 104267, (2020).
56. Pin Wang, Ziyu Yin, Linfeng Gao, Hui Li, Tongyu Zhang, **Qing Shen**, Jun Lv, Yingfang Yao, Wenjun Luo, Zhigang Zou; "Thiourea-assisted coating of dispersed copper electrocatalysts on Si photocathodes for solar hydrogen production", *Journal of Energy Chemistry*, 40, 75-80, (2020).
57. Xu, Yafeng; Chen, Wenyong; Hu, Linhua; Pan, Xu; Yang, Shangfeng; **Shen, Qing**; Zhu, Jun; "Template deposition of Sb_2S_3 for solid-state sensitized solar cells", *Journal of Alloys and Compounds*, 784, 947-953, (2019).
58. Nakajima, Hiromitsu; Okazawa, Atsushi; Kubuki, Shiro; **Shen, Qing**; Itoh, Kiminori; "Determination of iron species, including biomineralized jarosite, in the iron-hyperaccumulator moss *Scopelophila ligulata* by Mössbauer, X-ray diffraction, and elemental analyses", *Biomaterials*, 32, 171-184, (2019).
59. Feng Liu, Chao Ding, Yaohong Zhang, Taichi Kamisaka, Qian Zhao, Joseph M. Luther, Taro Toyoda, Shuzi Hayase, Takashi Minemoto, Kenji Yoshino, Bing Zhang, Songyuan Dai, Junke Jiang, Shuxia Tao, and **Qing Shen**; "GeI₂ Additive for High Optoelectronic Quality CsPbI_3 Quantum Dots and Their Application in Photovoltaic Devices", *Chemistry of Materials*, 31, 3324-3326, (2019).
60. Naoki Nakazawa, Yaohong Zhang, Feng Liu, Chao Ding, Kanae Hori, Taro Toyoda, Yingfang Yao, Yong Zhou, Shuji Hayase, Ruixiang Wang, Zhigang Zou, **Qing Shen**; "The Interparticle Distance Limit for Multiple Exciton Dissociation in PbS Quantum Dot Solid Films", *Nanoscale Horizons*, 4, 445-451, (2019).
61. Shen, Y.; Guo, S.-G.; Du, F.; Yuan, X.-B.; Zhang, Y.; Hu, J.; **Shen, Q.**; Luo, W.; Alsaedi, A.; Hayat, T.; Wen, G.; Li, G.-L.; Zhou, Y.; Zou, Z.; "Prussian blue analogue-derived Ni and Co bimetallic oxide nanoplate arrays block-built from porous and hollow nanocubes for the efficient oxygen evolution reaction", *Nanoscale*, 11, 11765-11773, (2019).

62. Yafeng Xu, Wenyong Chen, Linhua Hu, Xu Pan, Shangfeng Yang, **Qing Shen**, Jun Zhu.; "Template deposition of Sb₂S₃ for solid-state sensitized solar cells", *Journal of Alloys and Compounds*, 784, 947-953, (2019).
63. Chi Huey Ng, Kohei Nishimura, Nozomi Ito, Kengo Hamada, Daisuke Hirotsu, Zhen Wang, Fu Yang, Satoshi Iikubo, **Qing Shen**, Kenji Yoshino, Takashi Minemoto, Shuzi Hayase; "Role of GeI₂ and SnF₂ additives for SnGe perovskite solar cells", *Nano Energy*, 58, 130-137, (2019).
64. Hu, J.; He, H.; Zhou, X.; Li, Z.; **Shen, Q.**; Luo, W.; Alsaedi, A.; Hayat, T.; Zhou, Y.; Zou, Z.; "BiVO₄ tubular structures: oxygen defect-rich and largely exposed reactive {010} facets synergistically boost photocatalytic water oxidation and the selective N=N coupling reaction of 5-amino-1H-tetrazole", *Chemical Communications*, 55/ 39, 5635-5638, (2019).
65. 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*, (2019).
66. Kazuki Kanazawa, Kazuki Noritake, Yuriko Takaishi, and **Shouhei Kidera** ; "Microwave Imaging Algorithm Based on Waveform Reconstruction for Microwave Ablation Treatment", *IEEE Trans. Antennas & Propagation*, (2019).
67. Masafumi Setsu, Takumi Hayashi, Jianghaomiao He, and **Shouhei Kidera** ; "Super-resolution Doppler Velocity Estimation by Kernel Based Range- τ Point Conversions for UWB Short Range Radars", *IEEE Trans. Geoscience & Remote Sensing*, (2019).
68. Takamaru Matsui and **Shouhei Kidera** ; "Range Points Migration Based Spectroscopic Imaging Algorithm for Wide-beam Terahertz Subsurface Sensor", *IEICE Trans. Electron*, Vol.E102-C/ 1, (2019).
69. Kazuki Noritake and **Shouhei Kidera** ; "Surface Clutter Suppression with FDTD Recovery Signal for Microwave UWB Mammography", *IEICE Trans. Electron*, Vol.E102-C/ 1, (2019).

4.2. 【国際会議プロシーディングス等】

1. H. Ichikawa, S. Yokogawa, Y. Kawakita, K. Sawada, T. Sogabe, A. Minegishi, and H. Uehara; "An Approach to Renewable-Energy Dominant Grids via Distributed Electrical Energy Platform for IoT Systems", IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids, WS-1, 1570562161 (2019).
2. (Invited) **Tomah Sogabe** : "Implementing Classical-Quantum Hybrid Machine Learning Algorithms", The International Workshop on Quantum Computing, Information Processing and Machine Learning (IWQCIPML) December 2-4, 2019. Taipei, Taiwan
3. K. Terada, T. Togawa, F. Ozeki, K. Sakamoto, **T. Sogabe and K. Yamaguchi** : "Sunlight Concentration Properties of InAs/InAsSb Ultrahigh-Density Quantum -Dot Solar Cells", The 46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, (June 17-21, 2019), Chicago, B8-776.
4. Kei Takahashi, **Tomah Sogabe** : "Online optimization of AGV transport systems using deep reinforcement learning", p53-57, NCSS: International Workshop on Networking, Computing, Systems, and Software, p63-68 (November 26-29, 2019),Nagasaki, Japan
5. Dinesh Bahadur Malla, Katsuyoshi Sakamoto, **Tomah Sogabe** : "Multi-agent Based Energy Balancing Management Algorithm for Smart Grid System", p58-62, NCSS: International Workshop on Networking, Computing, Systems, and Software, p63-68 (November 26-29, 2019),Nagasaki, Japan
6. Koudai Shiba, Katsuyoshi Sakamoto, **Tomah Sogabe** : "Variational Quantum Support Vector Machine based on Deutsch-Jozsa Ranking", NCSS: International Workshop on Networking, Computing, Systems, and Software, p63-68 (November 26-29, 2019),Nagasaki, Japan
7. Tomoaki Kimura, Katsuyoshi Sakamoto, **Tomah Sogabe** : "Development of Alpha Zero-based Reinforcement Learning Algorithm for Solving Partially Observable Markov Decision Process (POMDP) Problem", p69-73, NCSS: International Workshop on Networking, Computing, Systems, and Software, p63-68 (November 26-29, 2019),Nagasaki, Japan
8. Masaya Watabe, Koudai Shiba, Katsuyoshi Sakamoto, **Tomah Sogabe** : "Quantum Circuit Learning Using Error Backpropagation", p74-82, NCSS: International Workshop on Networking, Computing, Systems, and Software, p63-68 (November 26-29, 2019),Nagasaki, Japan
9. Takamitsu Kishida, **Kenji Sawada, Seiichi Shin**",Control Flow Verification for Program Safety Update,ASCC2019,2019,2019,0,1
10. Kaito Sato, Jun-ichi Toji, **Kenji Sawada, Hiroyuki Ichihara, Seiichi Shin**",Event Triggered Model Predictive Control for Descending Drone,SICE Annual Conference,2019,2019,0,1
11. Takuya Niikura, **Kenji Sawada, Seiichi Shin**",Dynamic Profile Modeling for Node Connectivity Verification on Node-RED,SICE Annual Conference,2019,2019,0,1
12. Ryota Hasegawa, **Kenji Sawada, Kosuke Hata, Shintaro Fujita, Seiichi Shin**",On the Driving State Separation and Estimation of Industrial Control System Using Machine Learnin,SICE Annual Conference,2019,2019,0,1
13. **Kenji Sawada, Shu Hosokawa**",Control System Security Training and Education in UEC,SICE Annual

Conference,2019,2019,0,1

14. Mamoru Sakura, **Kenji Sawada, Seiichi Shin**, Osamau Kaneko, Isao Matsuda",The Energy-Based Auto-Verification focused on Hierarchical Model Structure for Model Based Development,IECON2019,2019,2019,0,1
15. Kousei Sakata, Shintaro Fujita, **Kenji Sawada, Seiichi Shin**, Shu Hosokawa, Ippei Maeta",On the implementation of multiple anomaly detection functions to a third-party monitoring system for secured control,SII2020,2020,2020,0,1
16. Takuma Wakasa, Yoshiki Nagatani, **Kenji Sawada, Seiichi Shin**",Switched Pinning Control for Vehicle Platoons via Mixed Logical Dynamical System Modeling,SII2020,2020,2020,0,1
17. Takuya Niikura, **Kenji Sawada and Seiichi Shin**",On the Profile Verification of IoT Application on Node-RED,AROB2020,2020,2020,0,1
18. Mamoru Sakura, **Kenji Sawada, Seiichi Shin**, Osamu Kaneko, Isao Matsuda",Modeling guideline for the energy-based auto-verification,AROB2020,2020,2020,0,1
19. **S. Yokogawa**, K. Kunii, and R. Nakazato; "Chip-level Electromigration Evaluation using GENG estimations", Proc. of Advanced Metallization Conference 2019: 29th Asian Session 2019 ADMETA plus, p. 52 (2019).
20. T. Murota, T. Mimura, P. Gomasang, **S. Yokogawa**, and K. Ueno; "Humidity Reliability of a Commercial Flash Memory for Long Term Storage", Proc. of Advanced Metallization Conference 2019: 29th Asian Session 2019 ADMETA plus, p. 86 (2019).
21. **S. Yokogawa**; "Reliability statistics for next-generation interconnects -The combination of physical modeling and statistical techniques-", 2019 MRS Spring Meeting (2019), invited.
22. **S. Yokogawa** and K. Kunii; "A Simple Prediction Method for Chip-level Electromigration Lifetime using Generalized Gamma Distribution", IEEE International Reliability Physics Symposium, P.MB.9, pp.1-6 (2019). <https://doi.org/10.1109/IRPS.2019.8720404>
23. Jin Mitsugi, Hiromu Kamei, Yuusuke Kawakita, **Haruhisa Ichikawa**, "Real-Time Separation of Collided Signals in Multiple Zones Backscatter Communication System," 2019 IEEE International Conference on Wireless For Space and Extreme Environments (WiSEE). DOI: 10.1109/WiSEE.2019.8920346
24. Gaurav Kapil, Takeru Bessho, Takumi Kinoshita, **Qing Shen**, Taro Toyoda, Takuro N. Murakami, Takashi Minemoto, Hiroshi Segawa, **Shuzi Hayase**: "Research pertaining to fabricate 20.4% efficient tin/lead perovskite solar cells"; presented at MRS 2019 Fall meeting and exhibit, Boston, Massachusetts, USA. Dec 1- Dec 6, 2019.
25. Gaurav Kapil, Takeru Bessho, Takumi Kinoshita, **Qing Shen**, Taro Toyoda, Takuro N. Murakami, Takashi Minemoto, Hiroshi Segawa, **Shuzi Hayase**: "Research to obtain high efficiency in tin-lead perovskite solar cells"; presented at 80th JSAP Autumn Meeting, Sapporo, Japan. September 18-September 21, 2019.
26. Gaurav Kapil, Takeru Bessho, Takumi Kinoshita, **Qing Shen**, Taro Toyoda, Takashi Minemoto, Takuro N. Murakami, Hiroshi Segawa, **Shuzi Hayase**: "Strain engineering in tin-lead perovskite solar cells to improve the power conversion efficiency Reduced strain by cesium addition leading to the

- improvement in the efficiency of tin-lead mixed perovskite solar cells”; presented at 16th Next-generation solar power generation system Symposium, Miyazaki, Japan. July 5- July 6, 2019.
27. **Shuzi Hayase**, “Recent progress on narrow band gap perovskite solar cells”, IEEE ICASI,2019 IEEE International Conference on Applied System Innovation, Kitakyushu, 2019/4/12.
 28. **S. Hayase**, A. Kamarudin, G. Kapil, Ng, Huey, N. Nishimura, T. Ripolles, K. Hamada, Y. Ogomi, F. Yang, S. Iikubo, K. Kinoshita, K. Bessho, H. Segawa, S. Qing, K. Yoshino, T. Minemoto, “Pb Free and Pb Less Perovskite Solar Cells with Narrow, Band Gap- Aiming at High Efficiency and All Perovskite Tandem Solar Cells”, EU-PVSEC 9/11/2019.
 29. **Shuzi Hayase**, “Perovskite solar cells with narrow band gap or wide band gap -Toward tandem and Pb free perovskite Solar Cells”, The 8th LIA NextPV International Workshop 11/19/2019, Tokyo, Japan.
 30. **Shuzi Hayase**, “Narrow Band Gap Perovskite Solar Cells Containing Sn”, MRS Fall conference, 12/7/2019 Boston.
 31. K. Aji, T. Tokushima, K. Enoki, M. Kinoshita, **T. Okawa**, Convection effect of the freeze valve melting process on molten salt reactor, Proceedings of 27th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE27), Tsukuba, Ibaraki, May 19-24, Paper No. ICONE27-1346 (2019).
 32. T. Tokushima, I. K. Aji, K. Enoki, M. Kinoshita, **T. Okawa**, An experimental study of the freeze valve opening time with considering wall effect, Proceedings of 27th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE27), ICONE27-1519 (2019).
 33. **K.Ishibashi**; "ACOMP 2019 International Conference on Advanced Computing and Applications", Steering Committee(2019/11/27).
 34. **K.Ishibashi**; "The 1st ECTI-UEC WS on AI and Applications",WorkShop, General Co Chair(2019/11/27).
 35. **Shohei Kidera**, IEEE IGARSS,2019 IEEE International Conference on, Yokohama, 2019/7/28

4.3. 【国内会議、学会口頭発表等】

1. 横川慎二, 市川晴久, 澤田賢治, 曾我部東馬, 川喜田佑介; "i-パワードエネルギーによるデータ駆動型社会基盤と不具合未然防止", 第 10 回横幹連合コンファレンス予稿集, C-1-4 (2019).
2. 戸川匠, 鈴木亮介, 寺田圭佑, 坂本克好, 曾我部東馬, 山口浩一: 「面内超高密度 InAs 量子ドット層を導入した量子ドット太陽電池の集光特性(2)」, 2019 年 (平成 31 年) 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集 10a-PB3-2 (2019).
3. 曾我部 東馬、斯波 廣大 坂本 克好、山口 浩一: 「励起子型量子ゲートシミュレーター手法による量子ドット発光解析」(1.電通大 i-PERC、2.電通大 基盤理工、3.(株) グリッド) 2019 年 (平成 31 年) 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会 18p-E216-9(2019).
4. Dinesh Bahadur Malla, Tomoyuki Hioki, Kei Takahashi, Masaru Sogabe, Katsuyoshi Sakamoto, **Koichi Yamaguchi, Tomah Sogabe** :“Attention-masking extended deep Q network (AME-DQN) reinforcement learning algorithm for combinatory optimization of smart-grid energy”, 2019 年度人工知能学会全国大会 (第 33 回) 新潟県新潟市 (朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター) (2019.6.4-7).
5. 高橋 慧, 坂本 克好, 山口 浩一, 沼尻 匠, 曾我部 完, 曾我部 東馬: 「密度球を用いた Graph CNN 深層学習手法による渋滞予測」, 2019 年度人工知能学会全国大会 (第 33 回) 新潟県新潟市 (朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター) (2019.6.4-7).
6. **Tomah Sogabe**, Dinesh Bahadur Malla, Tomoyuki Hioki, Kei Takahashi, Masaru Sogabe, Katsuyoshi Sakamoto, **Koichi Yamaguchi** :“Multi-carrier energy hub management through deep deterministic policy gradient over continuous action space”, 2019 年度人工知能学会全国大会 (第 33 回) 新潟県新潟市 (朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター) (2019.6.4-7).
7. 曾我部 東馬, 斯波 廣大, 坂本 克好, 山口 浩一, Dinesh Bahadur Malla: 「量子コンピューティングにおける最適解の全量子探索」, 2019 年度人工知能学会全国大会 (第 33 回) 新潟県新潟市 (朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター) (2019.6.4-7).
8. 木村 友彰, 渡部 雅也, 坂本 克好, 山口 浩一, Dinesh Bahadur Malla, 曾我部 東馬: 「汎化ゴールにおける連続動作型ロボットアームの深層強化学習手法の開発」, 2019 年度人工知能学会全国大会 (第 33 回) 新潟県新潟市 (朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター) (2019.6.4-7).
9. 渡部 雅也, 楊 坤, Dinesh Bahadur Malla, 坂本克好, 山口浩一, 曾我部東馬: 「アルファゼロ型強化学習アルゴリズムを用いた最適制御手法の開発」, 2019 年度人工知能学会全国大会 (第 33 回) 新潟県新潟市 (朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター) (2019.6.4-7).
10. 斯波 廣大, 坂本 克好, 山口 浩一, Dinesh Bahadur Malla, 曾我部 東馬: 「量子シミュレーターを用いた畳み込み型量子自己符号化器の開発」, 2019 年度人工知能学会全国大会 (第 33 回) 新潟県新潟市 (朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター) (2019.6.4-7).
11. 阪田恒晟, 藤田真太郎, 澤田賢治, 新 誠一, 前田一平, 細川 嵩, コントローラに対する第三者監視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, 2019, 2019, 0, 0
12. 松崎和賢, 澤田賢治, 再生可能エネルギーシステムの遠隔制御におけるセキュリティ評価環境の構築, 電気学会電子・情報・システム部門大会, 2019, 2019, 0, 0

13. 佐倉 衛, 澤田賢治, 金子 修, 新 誠一, 松田 功, モデルベース開発の為にエネルギー検証自動化, 電気学会電子・情報・システム部門大会, 2019, 2019, 0, 0
14. 福永秀樹, 澤田賢治, 新誠一, 濱田吉郎, 航空機の上下加速度に対する最悪突風の解析—Generic Transport Model を用いて—, 第 57 回飛行機シンポジウム, 2019, 2019, 0, 0
15. 若狭拓馬, 永谷禎基, 澤田賢治, 新誠一, 車群合流および分離のための切り替え型ピニング制御, 第 62 回自動制御連合講演会, 2019, 2019, 0, 0
16. 佐藤海斗, 藤司純一, 澤田賢治, 市原裕之, 新誠一, クアッドロータの線形化における反復学習的モデル誤差抑制, 第 62 回自動制御連合講演会, 2019, 2019, 0, 0
17. 福永秀樹, 澤田賢治, 新誠一, 濱田吉郎, Generic Transport Model を用いた航空機の上下加速度 に対する有限時間最悪外乱解析, 第 62 回自動制御連合講演会, 2019, 2019, 0, 0
18. 佐倉 衛, 澤田賢治, 金子 修, 新 誠一, 松田 功, エネルギー保存則に着目したプラントモデル検証自動化とモデリングガイドライン, システム・情報部門学術講演会 (SSI2019), 2019, 2019, 0, 0
19. 阪田恒晟, 藤田真太郎, 澤田賢治, 新 誠一, 前田一平, 細川 嵩, 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 (SSI2019), 2019, 2019, 0, 0
20. 新倉拓也, 澤田賢治, 新誠一, Node-RED におけるアプリケーション開発のための動的プロファイル適用型モデル検証, システム・情報部門学術講演会 (SSI2019), 2019, 2019, 0, 0
21. 松下遥香, 佐藤海斗, 佐倉衛, 澤田賢治, 新誠一, Human-In-the-Loop System によるドライバー個性を反映した自動運転に関する研究, MSCS2020, 2020, 2020, 0, 0
22. 若狭拓馬, 澤田賢治, 新誠一, 切り替え型ピニング制御を用いた複数車群の経路計画と経路追従, MSCS2020, 2020, 2020, 0, 0
23. 福永秀樹, 澤田賢治, 新誠一, 濱田吉郎, 航空機の上下加速度に対する有限時間の最悪外乱と最適入力, MSCS2020, 2020, 2020, 0, 0
24. 横川 慎二, 遠藤駿; "人对機械システムにおける信頼成長の分析", 電子情報通信学会技術研究報告, 信頼性, R2019-50 (2019).
25. 横川 慎二; "ワイブルベイズ統計モデリングにおける故障物理情報の応用", 第 29 回 RC J 電子デバイスの信頼性シンポジウム・信頼性セミナー講演 (2019).
26. 武山真弓, 横川 慎二, 佐藤勝, 安井崇; "エゾシカ肉の電気的特性評価とそのおいしさの解析," 電子情報通信学会技術研究報告, 電子部品・材料、一般, CPM2019-37 (2019)
27. 國井喬介, 遠藤駿, 中里諒, 横川 慎二; "局所クラスタ化した欠陥を伴う TDDB 寿命分布のパラメータ推定精度の研究", 第 49 回信頼性・保全性シンポジウム予稿集, pp. 212-217 (2019).
28. 遠藤 幸一, 瀬戸屋 孝, 國井 喬介, 横川 慎二; "信頼性加速試験における小サンプルサイズでの解析精度に関するシミュレーション研究", 第 49 回信頼性・保全性シンポジウム予稿集, pp. 218-230 (2019).
29. 横川 慎二, 國井喬介; "クラスター欠陥とストレス分布に基づく先端デバイスの信頼度モデリング", 電子情報通信学会技術研究報告, 信頼性, R2019-11 (2019).
30. 森田裕, 横川 慎二; "自動／有人レジに対する不満の差異に着目した対人自動システムへの信頼構造の分析", 第 27 回日本信頼性学会春季信頼性シンポジウム発表予稿集, pp. 91-94 (2019).
31. 田村 光汰, 薩川 里奈, 川喜田 佑介, 戸辺義人, 市川 晴久: USB-PD における電力の合成分配の制約に関する検討, 計測制御学会 計測部門スマートセンシングシステム部会 研究発表会, 2019/11/15-16.

32. 田村 光汰, 川喜田 佑介, 戸辺 義人, 横川 慎二, **市川 晴久**: US-PDを活用した電力の合成分配制御に関する検討, 情報処理学会第82回全国大会, 252-5258 (2020/3/5-7).
33. 吉川祐太、**石橋孝一郎**; "Loraを用いたBeat方式ダストセンサ", 電子情報通信学会総合大会,1 (2020).
34. 熊谷慎也・**石橋孝一郎**; "低電力温度センサーRF TAGの特性", 電子情報通信学会総合大会,1 (2020).
35. Keita Daimatsu, Jiro Ida, Takuya Yamada, Takayuki Mori, **Koichiro Ishibashi**;"Super steep SS "PN-Body tied SOI-FET with 65 nm thin Box FD-SOI", IEEE ICTA,1 (2019).
36. Yuki Iwata, **Koichiro Ishibashi**, Guaghao Sun;"Vital Sign Acquisition Using Doppler Radar under Random Body Movements Rejected by Pca Algorithm", ICBME,1 (2019).
37. ムンフツォグ ムンフズル・**石橋孝一郎**;"RF エネルギーハーベスティング向け DCDC コンバータの検討", 電子情報通信学会 デザインガイア,66 (2019).
38. ムンフツォグ ムンフズル・**石橋孝一郎**;"RF エネルギーハーベスティング向け DCDC コンバータの検討", デザインガイア 2019 (IEICE 研究会) ,ICD-4 (2019).
39. Wataru Yabuki, Jiro Ida, Takayuki Mori, **Koichiro Ishibashi** and Yasuo Arai;"Effect of Vsub and Positive Charge in Buried Oxide on Super Steep SS"PN Body-Tied SOI-FET" and Proposal of CMOS without Vsub Bias", IEEE SOI-3D-Subthreshold Microelectronics Technology Unified Conference (IEEE S3S), (2019).
40. Keita Daimatsu, Jiro Ida, Takuya Yamada, Takayuki Mori, **Koichiro Ishibashi**;"Super steep SS "PN-Body tied SOI-FET" with 65 nm thin Box FD-SOI", IEEE ICTA, (2019).
41. Wataru Yabuki, Jiro Ida, Takayuki Mori, **Koichiro Ishibashi** and Yasuo Arai;"Effect of Vsub and Positive Charge in Buried Oxide on Super Steep SS"PN Body-Tied SOI-FET" and Proposal of CMOS without Vsub Bias",IEEE SOI-3D-Subthreshold Microelectronics Technology Unified Conference (IEEE S3S), (2019).
42. **石橋孝一郎**;"極急峻 SS を持つ"PN-Body Tied SOI-FET"を使った極低電力レクテナ", 電子情報通信学会, ISSN 2432-6380 (2019).
43. **石橋孝一郎**;"極急峻 SS を持つ急峻な SS を持つ"PN Body-Tied SOI-FET"における BOX 中の固定電荷と基板バイアスの影響", 電子情報通信学会,ISSN 2432-6380, (2019).
44. **石橋孝一郎**;"極急峻 SS を持つ急ドップラーレーダを用いた連続非接触血圧測定"における BOX 中の固定電荷と基板バイアスの影響",日本生体医工学会,1/1, (2019).
45. 羽田野凌太, 平田遼, 松田航平, 三浦典之, 李陽, **崎山一男**; "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",2020 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2020), 3E3-2/1 (2020)..
46. 高見豪, 菅原健, **崎山一男**, 李陽;"AES への 5 ラウンドの物理攻撃の可能性の考察",2020 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2020) , 3E3-5/1 (2020).
47. 杉本悠馬, 菅原健, **崎山一男**, 李陽;"無線通信から収集した電磁波を用いたテンプレート攻撃研究", 2020 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2020) , 3E3-5/1 (2020).
48. 薮茉莉花, **崎山一男**, 菅原健;"ARM Cortex-M0 における SAEAES の小型実装",2020 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2020) , 2B3-4-1/1 (2020).
49. 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",2020 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2020) ,3C3-1/1 (2020).

50. 藤聡子, 土屋彩夏, 李陽, 崎山一男, 菅原健; "調光機能のある LED の個体識別", 2020 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2020) , 3E1-3/ 1 (2020).
51. 八代理紗, 堀洋平, 片下敏宏, 汐崎充, 崎山一男; "RG-DTM PUF に対する Deep Learning を用いたクローニング攻撃", 2020 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2020) , 3E1-1/ 1 (2020).
52. 植村友紀, 李陽, 三浦典之, 岩本貢, 崎山一男, 太田和夫; "鍵のランダムな漏洩に対する AES 鍵スケジュール復元アルゴリズム", 2020 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2020) , 2B1-1/ 1(2020).
53. 品川和雅, 三浦典之, 岩本貢, 崎山一男, 太田和夫; "気泡検出器を用いたゼロ知識非破壊検査", 2020 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2020) , 2E2-3/ 1(2020).
54. 羽田野凌太, 李陽, 多田捷, 松田航平, 三浦典之, 菅原健, 崎山一男; "レーザーフォールト注入攻撃への対策が施された AES 暗号チップの脆弱性評価", IEICE2019 年ソサイエティ大会, (2019).
55. 椎名瞭, 菅原健, 松村竜我, 崎山一男; "LED 光源を用いた光サイドチャネル認証装置", IEICE2019 年ソサイエティ大会,(2019).
56. 杉本博英, 羽田野凌太, 庄司奈津, 崎山一男; "AES 暗号への 9 ラウンド差分故障解析の攻撃耐性の評価", IEICE2019 年ソサイエティ大会,(2019).
57. 星野翔, 椎名瞭, 松村竜我, 崎山一男; "レーザー光を使った音情報の漏洩に対する安全性評価", IEICE2019 年ソサイエティ大会,(2019).
58. 薮茉莉花, 崎山一男, 菅原健; "ARM Cortex-M0 における AES 暗号化処理の小型実装", IEICE2019 年ソサイエティ大会,(2019).
59. 土屋彩夏, 藤聡子, 李陽, 崎山一男, 菅原健; "積分球による光量の均一化に基づく LED の個体識別", IEICE2019 年ソサイエティ大会,(2019).
60. 高見豪, 菅原健, 崎山一男, 李陽; "AES に対する 5 ラウンド攻撃の物理攻撃への応用検討", IEICE2019 年ソサイエティ大会,(2019).
61. 立木 象, 杉山 涼, 山口浩一; "高密度 InAs 量子ドット層における欠陥起因の励起子発光マッピング", 2019 年 (令和元年) 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会 講演予稿集, 20p-E302-11, (2019).
62. 宇野江, 飯嶋直人, 山口浩一; "InP 基板上的 InAs/GaAsSb type-II 超格子構造を用いた中赤外 LED の作製", 2019 年 (令和元年) 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会 講演予稿集, 19p-PB5-14, (2019).
63. 田中元幸, 馬場慶一郎, 山口浩一; "面内超高密度 InAs 量子ドット層を導入した量子ドットレーザの作製", 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集, 11p-PA4-3, (2019).
64. 池田侑矢, 山口浩一, 坂本克好, 小林哲; "イオンビーム堆積法による InP/ZnS CQD 薄膜作製とキャラクターゼーション", 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集, 11p-S223-13, (2019).
65. 佐々木一夢, 馬飼野彰宜, 坂本克好, 山口浩一; "分子線堆積法による SiO_x 膜上への InAs 量子ドットの自己形成(3)", 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集, 11p-S223-13, (2019).
66. 立木 象, 杉山 涼, 山口浩一; "面内超高密度 InAs 量子ドット層の面内 PL マッピング解析(2)", 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集, 11p-S422-8, (2019).
67. 池田侑矢, 山口浩一, 坂本克好, 小林 哲; "エレクトロスプレーイオン源による薄膜のキャラクターゼーション", 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集, B2-3, (2019).
68. 金子修; "正準制御器を用いた多入力状態フィードバック制御系のデータ駆動型応答予測", 計測自動

- 制御学会制御部門第7回マルチシンポジウム, 3D2-1 (2020).
69. 池崎太一, **金子修**; "Virtual Internal Model Tuning におけるプレフィルタを用いた制御器更新性能", 計測自動制御学会制御部門第7回マルチシンポジウム, 3D2-4 (2020).
 70. 緒方健成, **金子修**; "擬似参照信号を用いた二自由度制御系に対するデータ駆動型応答予測", 第62回自動制御連合講演会, 1H3-05 (2019).
 71. 桑原圭佑, 定本知徳, **金子修**; "むだ時間系に対するデータ駆動制御型参照値整形", 第62回自動制御連合講演会, 1H3-01 (2019).
 72. 小林史弥, 定本知徳, **金子修**; "フィードフォワード制御のデータ駆動型設計における制御性能解析", 第62回自動制御連合講演会, 1H2-06 (2019).
 73. 大塚勝登, 池崎太一, **金子修**; "制御器パラメータの正則化を用いたFRIT", 第62回自動制御連合講演会", 1H2-03 (2019).
 74. 川口将貴, **金子修**; "非最小位相系に対するERIT", 第62回自動制御連合講演会, 1H2-05 (2019).
 75. 樋口 奎, 池崎 太一, **金子 修**; "むだ時間系に対するスミス補償器の Virtual Internal Model Tuning", 第62回自動制御連合講演会, 1H2-01 (2019).
 76. **金子修**, 菊池竣介, 川口将貴; "冷間タンデム圧延制御システムのシミュレータ作成", 第62回自動制御連合講演会, 1H2-05 (2019).
 77. 桑原圭佑, **金子修**; "I-PD 制御系に対するデータ駆動制御型参照値整形", 2019年電気学会 電子・情報・システム部門大会, TC3-6 (2019).
 78. 池崎太一, **金子修**; "Virtual Internal Model Tuning を用いた外乱抑制のための制御器更新", 2019年電気学会 電子・情報・システム部門大会, TC3-5 (2019).
 79. **金子修**; "仮想参照信号を用いたデータ駆動応答予測", 第63回システム制御情報学会研究発表講演会, TS11-1-5 (2019).
 80. 飯塚悠介, **金子修**; "Max-min-plus 代数に基づく車線数変動を伴う二車線交通流のモデリングと解析", 第63回システム制御情報学会研究発表講演会, Gsa01-7 (2019).
 81. 大塚勝登, 緒方健成, 成田浩昭, **金子修**; "FRIT による制御弁の開度制御", 第63回システム制御情報学会研究発表講演会, GsB09-7 (2019).
 82. **木寺正平**, "逆散乱解析法を用いたマイクロ波アブレーション画像化法", 電子情報通信学会 総合大会, (2020).
 83. 諸岡貴英, **木寺正平**, "マイクロ波非破壊検査のためのCSI法に基づく目標計上位置及び複素誘電率推定の双方向処理", 電子情報通信学会 総合大会, (2020).
 84. 花房宗裕, 中村慎吾, 工藤高裕, **木寺正平**, "マイクロ波非破壊検査のためのCSI法による複素誘電率再構成の実験的検討", 電子情報通信学会 総合大会, (2020).
 85. 何姜浩森, 寺島将太, 山田秀行, **木寺正平**, "時系列複素データ解析によるミリ波帯回折波を用いた見通し外人体識別法", 電子情報通信学会 総合大会, (2020).
 86. 大森知樹, 赤峰悠介, 磯野友輔, 近藤勝彦, **木寺正平**, "波数空間分離とRPM法を統合した超分解能レーダ画像化法の実験的検討", 電子情報通信学会 総合大会, (2020).
 87. 安藤健, **木寺正平**, "波数空間分離とWKD法を統合した超分解能ドップラ速度, 距離分解法", 電子情報通信学会 総合大会, (2020).

88. 森本隼丈丸, 木寺正平, “テラヘルツ時間領域分光イメージングのための圧縮センシングの原理に基づく多層構造解析”, 応用物理学会 秋季学術講演会, (2019).
89. 松井高丸, 木寺正平, “テラヘルツ時間領域分光イメージングのための圧縮センシングの原理に基づく多層構造解析”, 応用物理学会 秋季学術講演会, (2019).
90. 林拓海, 木寺正平, “RPM 法とカーネルドップラー速度推定法の双方向処理に基づくレーダ画像化法”, 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, (2019).
91. Jianghaomiao He, 木寺正平, “カーネル密度推定を用いた超分解能ドップラー速度推定法の実験的検証”, 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, (2019).
92. 廣瀬海太, 木寺正平, “マイクロ波マンモグラフィのためのレーダデータ学習に基づく癌細胞識別”, 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, (2019).
93. 佐藤宏樹, 木寺正平, “マイクロ波マンモグラフィのための ROI 制約付き CSI 法を用いた複素誘電率再構成法”, 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, (2019).
94. 佐藤宏樹, 木寺正平, “マイクロ波マンモグラフィのための周波数統合型 CSI 法を用いた複素誘電率再構成法”, 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, (2019).
95. 寺西郁, 嶋田直樹, 小木曾公尚, “準同型暗号に基づくセキュアなモーションコントロール”, 電気学会全国大会, (2019/3/12).
96. 寺西郁, 嶋田直樹, 小木曾公尚, “モータ駆動リニアステージのためのセキュアなクラウドベース制御システムの開発”, 第 6 回 計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム, (2019/3/06).
97. 日下雅博, 小木曾公尚, “モータ駆動リニアステージのためのセキュアなクラウドベース制御システムの開発”, 第 6 回 計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム, (2019/3/06).

4.4. 【著書】

1. 曾我部 東馬:「強化学習アルゴリズム入門—「平均」からはじめる基礎と応用」, オーム社 (2019/05).
2. 曾我部 東馬, 笠原 亮介ら共著:「機械学習を中心とした異常検知技術と応用提案」, 情報機構 (2019/11).
3. 益田昭彦編著, 鈴木和幸, 原田文明, 山悟, 横川 慎二;「信頼性試験技術」, 日科技連出版社 (2019).
4. 崎山 一男 著, 菅原健 著, 李陽 著;「暗号ハードウェアのセキュリティ」, コロナ社 (2019).
5. K. Yamaguchi; “Molecular Beam Epitaxy”, Wiley, (2019).
6. 栗原聡監修, 金子 修, 全 72 名;「人と共生する AI 革命」, 株式会社 NTS, 329-336 (2019).
7. Kiminao Kogiso; “Privacy in Dynamical Systems”, Springer, 2020.

4.5. 【解説記事】

1. 横川 慎二, 市川 晴久, 曾我部 東馬, 澤田 賢治, 早瀬 修二, 大川 富雄;“超スマート社会を支える i-パワードエネルギー・システム”, 品質, Vol.49, No.3, pp.228-231(2019).
2. 崎山一男; “サイドチャネル攻撃と耐タンパー技術”, 電子情報通信学会知識ベース, 1 群-3 編-14 章/ 6 (2019).
3. 菅原健, 崎山一男; “組込機器のセキュリティを脅かすレーザーフォールト攻撃”, レーザー学会誌, 77/ 6, 305-309(2019).

4.6. 【招待講演】

1. Tomah Sogabe :“Implementing Classical-Quantum Hybrid Machine Learning Algorithms”, The International Workshop on Quantum Computing, Information Processing and Machine Learning (IWQCIPML) December 2-4, 2019. Taipei, Taiwan
2. S. Yokogawa; "Reliability statistics for next-generation interconnects -The combination of physical modeling and statistical techniques-", 2019 MRS Spring Meeting (2019), invited.
3. 小池淳一, チェン・リンハン, 横川 慎二; "極微細配線の課題解決にむけた金属間化合物の可能性", 電子情報通信学会シリコン材料・デバイス研究会, SDM2019-93 (2020. 2.7), 特別招待講演.
4. 横川 慎二; "ビッグ/スモールデータ時代の信頼性解析", JEITA 半導体信頼性認定ガイドラインセミナー (2020.1.31), 招待講演
5. 横川 慎二; "「数の難題」, 再来 — LSI信頼性の果たすものところから—", JEITA 半導体デバイス信頼性セミナー (2019.5.24), 招待講演.
6. N. Nishimura, K. Hamada, M. A. Kamarudin, Y. Ogomi, S. Iikubo, K. Kinoshita, G. Kapil, K. Bessho, H. Segawa, Shen Qing, K.Yoshino, T. Minemoto, S. Hayase, Relationship between relative lattice strain and efficiency for Sn-perovskite solar cells, HOPV, 2019/5/14, Rome.

7. 招待講演 **S. Hayase**, Wide and narrow gap perovskite solar cells, ICoPP2019, 2019/5/24, Incheon, Korea.
8. **S. Hayase**, Expected innovative materials for printable solar cells, Lecture in 計測大学、China, Hangzhou, 2019/5/14, China Jiliang University.
9. **S. Hayase**, Wide and Narrow bandgap perovskite solar cells, SISF2019, 2019/6/21, Seoul.
10. **S. Hayase**, Enhancement of Efficiency for Sn-perovskite Solar Cell, ICMAT, 2019/6/24, Singapore.
11. **S. Hayase**, Perovskite solar cells - Present and future, iSAMN2019, 2019/8/20, Putrajaya, Malaysia.
12. 早瀬修二 第236回 JOEM 研究会 有機エレクトロニクスのランドスケープ 有機太陽電池の進展と将来展望 2019/12/10
13. **S. Hayase**, Perovskite solar cells with Sn, SIPE 8/15/2019, San Diego, USA.
14. **S. Hayase**, Sn-Perovskite Solar Cells with Narrow Gap- Toward Tandem and Pb free Perovskite Solar Cells, PVSEC-28, 11/8/2019, Xian, China. Invited lecture.
15. 早瀬修二 ハロゲン化ペロブスカイト太陽電池の研究開発動向 -界面制御と Pb-free 化に向けて- 第406物性懇話会、名古屋大学、2019/11/22.
16. **Shuzi Hayase**, Perovskite solar cells with narrow band gap or wide band gap -Toward tandem and Pb free perovskite Solar Cells-, The 8th LIA NextPV International Workshop 11/19/2019, Tokyo, Japan
17. **Sjuzi Hayase**, Narrow Band Gap Perovskite Solar Cells Containing Sn, MRS Fall conference, 12/7/2019 Boston.
18. 早瀬修二、全タンデムペロブスカイト太陽電池の開発研究に向けて、ヨウ素学会 CIRIC セミナー、2020/2/19.
19. 金子修; "データ駆動制御 (FRIT) の基礎と最適チューニングへの応用", 日本テクノセンター株式会社, (2019.12.25), 特別招待講演..