

**脳の仕組みに倣った省エネ型の人工知能関連技術の開発・実証事業**  
**Development and Demonstration project of**  
**Energy-saving and Brain-inspired Artificial Intelligence technology**

**代表研究責任者** 村田 正幸 国立大学法人大阪大学大学院情報科学研究科

**研究開発期間** 令和3年度～令和5年度

**【Abstract】**

This document describes the development and demonstration results of energy-saving technologies based on Brain-inspired Artificial Intelligence.

We successfully realized energy-saving and data-saving AI inspired by the brain mechanisms including the inspiration. It operates with 1/1000th in the calculation time compared with deep learning, and can perform learning with 1/100th in the amount of data. It may be viewed that it has the recognition function corresponding to the recognition layer of deep learning, and therefore it can be applied to various applications by configuring a transfer learning model with various feature extraction models.

Also, we designed the hardware, which includes a dedicated digital chip and demonstrated the possibility of operating with a power consumption of only 1W with a size of 120cc. Additionally, we realized a power/performance management technology which enables solar-battery operation. Power measurement and analysis techniques support energy-saving AI design and its utilization in the various applications, too.

By using the energy- and data-saving brain-inspired AI, we achieved over 5% power reduction in the cyber system infrastructure (the digital-twin system) and physical system infrastructure (electric furnace based iron-scrap recycling plant) thorough demonstrations.

## 1 研究開発体制

○ **代表研究責任者** 村田 正幸 (大阪大学大学院情報科学研究科)

○ **研究分担者** 加納 敏行 (大阪大学大学院情報科学研究科)

下川 哲也 (大阪大学大学院情報科学研究科)

大歳 哲也 (大阪大学大学院経済学研究科)

島田 孝徳 (大阪大学大学院情報科学研究科)

下西 英之 (大阪大学サイバーメディアセンター)

小南 大智 (大阪大学先導的学際研究機構)

TECHASARNTIKUL NATTAON (大阪大学サイバーメディアセンター)

柏岡 秀紀 (情報通信研究機構未来 ICT 研究所脳情報通信融合研究センター)

村田 勉 (情報通信研究機構未来 ICT 研究所脳情報通信融合研究センター)

細田 一史 (情報通信研究機構未来 ICT 研究所脳情報通信融合研究センター)

|        |                                   |
|--------|-----------------------------------|
| 林 燦碩   | (情報通信研究機構未来 ICT 研究所脳情報通信融合研究センター) |
| 鈴木 利一  | (株式会社 iD)                         |
| 成澤 孝悦  | (株式会社 iD)                         |
| 田野岡 貴之 | (株式会社 iD)                         |
| 沼田 宣宏  | (株式会社 iD)                         |
| 吉岡 剛史  | (株式会社 iD)                         |
| 奥村 慎一  | (株式会社 iD)                         |
| 寺尾 貴明  | (株式会社 iD)                         |
| 中坂 淳一  | (株式会社 iD)                         |
| 後藤 慶太  | (株式会社 iD)                         |
| 吉田 大輔  | (株式会社 iD)                         |
| 渡邊 雅幸  | (株式会社 iD)                         |
| 北野 勇太  | (株式会社 iD)                         |
| 大西 慧太郎 | (株式会社 iD)                         |
| 日下部 辰馬 | (株式会社 iD)                         |
| 矢野 陽介  | (株式会社 iD)                         |
| 岡 雅彦   | (株式会社 iD)                         |
| 池下 良   | (株式会社 iD)                         |
| 伊東 秀男  | (株式会社 iD)                         |
| 渡辺 徹   | (株式会社 iD)                         |
| 江川 耕平  | (株式会社 iD)                         |
| 大室 孝司  | (株式会社 iD)                         |
| 元氏 一馬  | (株式会社 iD)                         |
| 中村 勝一  | (株式会社 iD)                         |
| 荒井 俊貴  | (株式会社 iD)                         |
| 柴田 純一  | (株式会社 iD)                         |
| 長内 継魅  | (株式会社 iD)                         |
| 井上 弘士  | (九州大学大学院システム情報科学研究院)              |
| 柴村 英智  | (九州大学大学院システム情報科学研究院)              |
| 長谷川 剛  | (東北大学電気通信研究所)                     |
| 研究協力者  | 坂田 基歩 (千代田鋼鉄工業)                   |
|        | 大森 巧也 (千代田鋼鉄工業)                   |

○ **総合ビジネスプロデューサ**

樹 世中 (株式会社野村総合研究所)

○ **ビジネスプロデューサ**

|       |                                   |
|-------|-----------------------------------|
| 中澤 忠輝 | (大阪大学共創機構)                        |
| 加納 敏行 | (大阪大学大学院情報科学研究科)                  |
| 田口 隆久 | (情報通信研究機構未来 ICT 研究所脳情報通信融合研究センター) |
| 鈴木 利一 | (株式会社 iD)                         |
| 井上 弘士 | (九州大学大学院システム情報科学研究院)              |

○ **研究開発期間** 令和3年度～令和5年度

○ **研究開発予算** 総額 912 百万円

(内訳)

| 令和3年度   | 令和4年度   | 令和5年度   |
|---------|---------|---------|
| 200 百万円 | 400 百万円 | 312 百万円 |

## 2 研究開発課題の目的および意義

### 背景

Society 5.0 の進展によりあらゆるものが情報通信でつながり融合していく社会において、エネルギーを制約要因としないために、ヒト脳の記憶とひらめき・認知のふるまいをモデル化し、計算機で再現可能なソフトウェアアルゴリズムを実現する新たなアプローチにより、既存の人工知能技術（数百億を超える神経回路を大規模な計算により再現する深層学習やビッグデータを必要とする機械学習）に比べて省エネ（省計算量・少計算資源）、少ない学習データで学習可能、かつノイズやバラツキにロバストな脳型人工知能技術の確立が求められる。ヒト脳の認知機構に倣うモデル（「ゆらぎ学習」モデル）には、大量の知識への対応と認知精度に課題があり、AI 技術として活用するには性能的な課題が残存していた。そこで本研究開発では、ヒト脳の大規模知識（記憶）、認知機構に加えてひらめき機構を解明し、その知見・成果に倣うことで「ゆらぎ学習」モデルの課題を解決し、大規模知識に対応した深層学習に匹敵する認知精度を実現する「拡張ゆらぎ学習」技術を確立する。この技術を用いた脳型 AI アルゴリズム（以下、脳型 AI）「拡張ゆらぎ学習」により情報通信（AI 処理）由来の CO<sub>2</sub> 排出を削減する（Green of AI）とともに、大量の計算資源や学習データの確保が難しく、データにバラツキやノイズが多い等の既存の人工知能技術の適用が難しい領域への導入を促進し、業務の高効率化と同時に省エネ化を図り、CO<sub>2</sub> 排出削減（Green by AI）に貢献することを念頭において、脳に倣った次世代人工知能デバイス関連技術に取り組む。

### 政策目標（アウトカム目標）

情報通信社会のグリーン化を実現し得る次世代人工知能デバイスを実社会に実装するために必要な技術を確認するとともに、脱炭素化に向け、技術的イノベーションから国際社会へ貢献し得る重要な特許・論文等の成果を創出する。

### 研究開発目標（アウトプット目標）

脳科学の知見を生かした高度な低消費電力を実現する人工知能関連技術を確認するとともに、その技術を適用することで、データセンター等の情報通信関連分野等における電力消費増加の抑制に資する活用方策に係る実証試験を行う。

## 3 研究開発成果（アウトプット）

### 3. 1 脳の情報処理メカニズムの知見を生かし超低消費電力で作動する認知理解モデル化

## 技術の確立

- ・少ない学習量かつ少ない消費エネルギーで、時間軸を有する連続的に変化する周辺環境等の違いから将来的の事象の予測等を行うヒトの脳の時空間環境認知メカニズムをモデル化するために必要な試験を行うとともに、その他の既存の脳科学の知見を生かし、欠損雑音等のノイズを含む過去の時間軸を有するデータであっても、非決定論的に将来を予測できる認知理解モデルを実現すること。当該モデルについては、時間軸を有する連続的なデータについて、2021 年度時点での既存の人工知能で同種の学習を行う場合に必要とされるデータ量に比べ、そのデータ量が 1/100 以下程度で実行できることを目標とする。
- ・当該認知理解モデルを用いて、動的に変化するマルチモーダルデータ（例：連続で変化する画像・動画、音声の周波数等）を観測し、リアルタイムに環境を非決定論的に認知・予測する機能を有するソフトウェアを実現すること。
- ・当該認知理解モデルについては、ヒトの脳が認知している時間軸を有する連続的なデータからトレンドを解析した上で、入力するデータを判断し、予測誤差を抑制しながら将来予測を可能とするような、現在の人工知能が有しない先端的な機構をソフトウェアとして実現すること。
- ・説明可能性を有した人工知能を実現するため、時空間環境認知の結果・過程等を確認できるようにすること。
- ・連続的（動的）な入力データを適切な速度で処理することで、上記の動的な将来を含む認知理解や推定誤差修正処理をリアルタイムに可能とすること。

## 研究開発成果

### 総括

- ・カオス力学系モデルでのヒト脳のひらめき機構の表現の可能性を発見、さらにその結果に基づき迅速ヘブ則モデルを深層学習に適用し、ワンショット学習モデルを実現した。
- ・深層学習\*（識別層のパラメータ約 6M 個、学習データ約 1k 以上）に対して約 6k～10k 個のパラメータ、1～10 個程度のデータで学習を可能とし（学習時の深層学習に対する計算量比率約 1/100k～1/60k、認識時の計算量比率 1/1k～1/600 に相当）、連続的（動的）な入力データのリアルタイム処理（状態の認識と将来予測、誤差の修正）を実現する脳型人工知能ソフトウェアモデルを完成した。

### ヒト脳の時空間環境認知機構の解明

・ヒト脳の時空間環境認知機構の解明では、機械学習課題のように選択肢がある視覚的課題において、徐々にヒントが現れる中でひらめく際の脳の動態を fMRI で解析。後頭葉（初期視覚）、側頭葉（高次視覚）、頭頂葉（空間・運動・統合）、前頭葉（注意・決定・解決）のネットワークを解明した。また選択肢のない視覚的課題でひらめき時の脳の動態を fMRI で解析。ヒトのひらめきにおける脳の高次階層の相互作用と動態の解明、そして新たなメカニズム仮説（論理モデル）を提案した。さらに「ひらめき」を要する視覚的課題として使用の白黒画像の認識課題で、事前に多量の白黒画像を学習さえすれば、深層学習器でも回答可能であることから、ヒト脳のひらめきの重要性は未学習であることを示した。

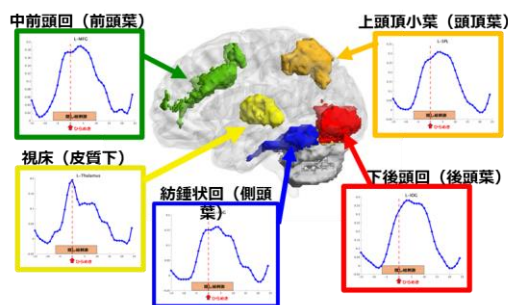


図-1 ひらめきに関連する神経活動パターン

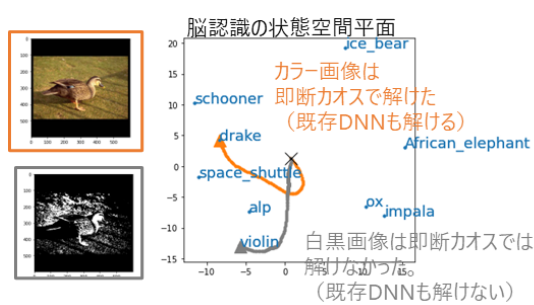


図-2 隠し絵認識におけるヒト脳・DNN 比較

・ヒト脳の時空間環境認知機構のモデル化に関して、カオスを活用した「ふるまいモデル」を構築。1000個以上のメモリをカオス同期によって識別できることを示し、ふるまいモデルの階層処理により時空間環境認知ソフトウェアモデルの高精度化（階層化）に寄与した。また、深層学習との融合により、ヒトと同じ画像を入力し認識にかかる時間特徴を再現できるモデルを構築、実行カオスに該当するカオスを活用したりカレントニューラルネットワークモデルの数理解析を行い、カオス力学系に適用できる、ゆらぎを活用した超省エネ脳型計算機のための情報処理原理を發明、拡散カオスに該当するカオスを活用したりカレントニューラルネットワークのモデル構築、これらの結果、脳の迅速ヘブ学習によるワンショット学習が可能であることを示した。

### 脳型時空間環境認知モデル「ゆらぎ学習」～モデルアーキテクチャ、機構と特徴

・ゆらぎ学習はそのアーキテクチャ、学習機構、認知（意思決定）機構において既存人工知能とは全く異なる構造・機構を有する。ゆらぎ学習はヒト脳の認知メカニズムを熱力学的モデル（ゆらぎモデル）、認知科学・脳科学に基づく主観的確率モデル（ベイズモデル）と非線形予測モデル（無色カルマンフィルタ）を組み合わせてふるまいモデルとして再現したものである。ゆらぎ学習は特徴抽出機能を持たず、ヒト脳という前頭前野における認知・意思決定に特化して実現したものである。具体的にはゆらぎ学習は知覚した特徴量を高速にマッピング、記憶する「知覚特徴量空間（刺激空間）」と知覚した特徴量空間を目的（知覚情報と知識情報の照合処理）に合わせて最適化（すべての知識の確率分布を一定値化）され、認知処理（意思決定処理）を行う自由ポテンシャル空間「知識空間（アトラクタ空間＝脳内仮想空間）」の2つの空間によって構成される。知識空間内には「認知状態」が存在し、知覚情報と知識情報の照合結果に従って「認知状態」の空間座標が遷移し、認知状態座標と知識座標が一定距離に接近した時に認知（意思決定）する（図3、図4参照）。

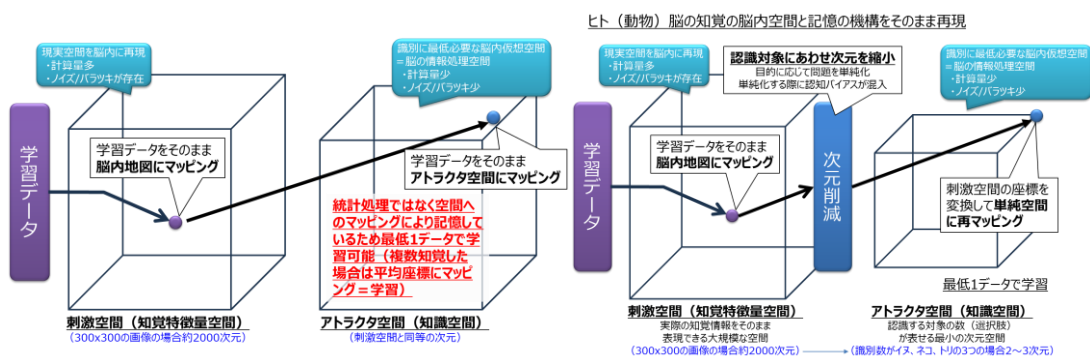


図-3 ゆらぎ学習（左図）ならびに拡張ゆらぎ学習の学習機構

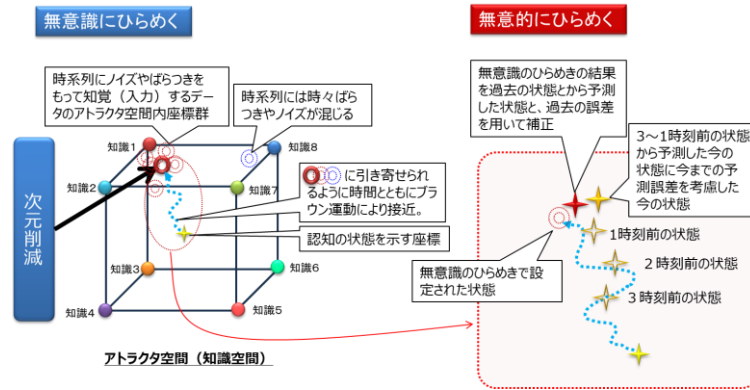


図-4 ゆらぎ学習の認知（意思決定）動作

この結果、ゆらぎ学習は少ない学習データで学習（1 データで記憶し 2 データ以上で学習）、省計算量（省エネ、ラズパイ上でも動作し消費電力 5W 未満）、さらに認知・意思決定のメカニズムそのものがデータにおけるノイズやばらつきの影響を最小化することができ、ノイズ・バラツキに対するロバスト性を有している。また、ソフトウェアを活用する開発者の視点では、ソースコードが非常にシンプルで小規模（コアモデルで 1kL 程度）であるため容易に改版・機能追加が可能となるという特徴も有している。

#### ゆらぎ学習の課題と解決に向けた取り組みならびにその成果

・一方で従来のゆらぎ学習はあくまでもヒト脳の認知メカニズムを再現したものであり、人工知能として活用するためには安定性、知識量、精度の面で改善すべき課題が存在する。これらの課題対して本研究で取り組んできた課題解決とその成果は以下の通りである。

・時空間環境認知ソフトウェアモデル（ゆらぎ学習）の高精度化に関して、アトラクタ空間の大規模化（次元の拡大）に伴う認知精度の低下に対してアトラクタ（知識）空間における次元削減並びに階層化により計算量を抑えつつ知識の大規模化に対応し、大規模なアトラクタ数においても高精度な「学習」と「認知」を実現した。一方、知覚特徴量次元数（入力データの特徴量数）がアトラクタ空間次元よりも少ない場合に認知精度が低下する問題については空間の決定論的次元拡張モデルを用いた次元拡張により知覚特徴量空間次元をアトラクタ空間次元相当に拡張する手法を確立し認知精度の向上を実現、「拡張ゆらぎ学習」として完成した。

次元削減と階層化について、「ゆらぎ学習」では知識空間（アトラクタ空間）を刺激空間そのままの空間を再現（刺激空間と同じ次元数）しているが、図-5 左図に示すようにカテゴリ数が大規模化（例：60 以上）すると状態が不安定化し、認知精度が極端に低下することが判明している。このためアトラクタ空間の次元圧縮についてはゆらぎ学習モデルにおいて、脳の意思決定モデルにおける Winner-take-all 機構として、これまでは 0 か 1 かでいうと 1 つしか 1 を勝者として認めなかったところ、複数の 1 により 1 つの勝者を定義する新しい indicator function

$$\delta_{\phi_i} = \prod_{j:\phi_i[j]=1} \sigma(z_j) \prod_{j:\phi_i[j]=0} (1 - \sigma(z_j))$$

(Otoshi et al., ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICC42927.2021.9500282 : 令和 3 年度成果論文)を定義したことにより、ゆらぎ学習では達成できなかった次元圧縮が可能となった。 $\sigma$  はシグモイド関数で、決定状態変数  $z$  が -1 ならゼロあたりへ、1 なら 1 あたりへ変換する。 $\phi$  はメモリにある 0,1 に対応する。これまでは  $\phi$  は (1,0,...,0) と (0,1,0,...,0) と

のように、 $n$  番目のアトラクタは、要素の  $n$  番目だけが 1 である  $\varphi$  でしか表現できていなかったのだが、昨年度の前述の成果によって、複数の 1 と 0 の組み合わせで 1 つの  $\varphi$  を表現できるようにゆらぎ学習を改良し次元圧縮を実現した。また大規模な知識においても安定した認知を実現、大規模化と高精度化に対応した。(図 5 右図参照)

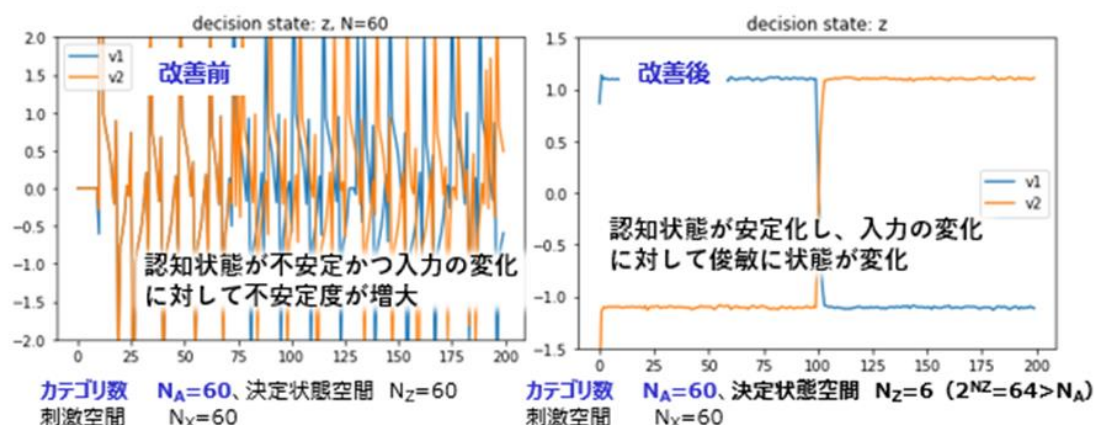


図-5 アトラクタ空間における次元削減効果

・階層化に関しては、例えばアトラクタの数が 100 個ありこれを 20 個が 5 セットあると考える。ここでいう 1 セット (20 個のアトラクタがある) をアトラクタセットと呼ぶ。これまで「アトラクタ」と呼んでいたものを「アトラクタセット」と読み替えて計算することを意味する。この階層モデルでは、上位階層において 5 つのアトラクタセットが存在し、これまで 5 つのアトラクタで計算していたことと同じことを上位階層でアトラクタセットとして実行することで、最大のアトラクタ空間次元数は 100 次元から 5 次元に削減することが出来た。そして 5 つのアトラクタから 1 つが選ばれれば、その中に入っている 20 個のアトラクタ (下位階層) をこれまで通りの脳型 AI モデルとして 20 次元アトラクタ空間で計算する。100 次元では不安定化するが、20 次元程度ならば安定的に結果を出すことができる。これが階層脳型 AI モデルである。実際の計算結果を図-6 (右図) に示す。

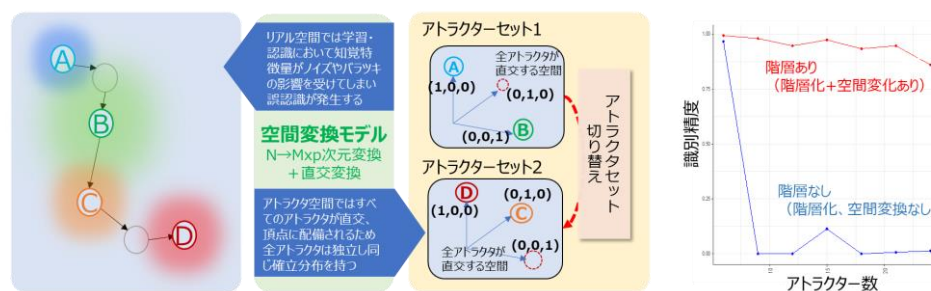


図-6 アトラクタ空間階層化による高精度化と効果比較

・つぎに少学習量かつ少演算量を特徴とする時空間環境認知技術 (ソフトウェアモデル) の実現において、ヒト脳の記憶メカニズムに倣うことで 1 データによる学習可能、かつ演算量に影響するパラメータ数を 6k~10k 個程度に抑えた拡張ゆらぎ学習に関して、深層学習 (Keras モデル) との比較を行った。その結果、Keras モデル識別層のパラメータ約 6M 個に対し、拡張ゆらぎ学習の場合、刺激空間→アトラクタ空間の空間変換モデルの有効パラメータ数は約 6k~10k 個となり、そのパラメータ比率は約

1/1000～1/600 となることを確認できた。さらに拡張ゆらぎ学習は 1 データ学習が可能で、学習時の計算量は  $1/(1000 \sim 600 \times \text{学習データ数})$  となることを確認した\*。

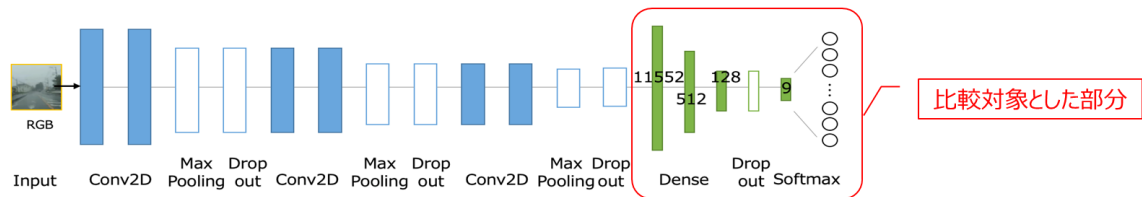


図-7 拡張ゆらぎ学習の計算量ベンチマーク対象とした Keras モデルの識別層

\*:Keras モデルによる 256x256、カテゴリ数 9 の画像識別時

### 3. 2 超低消費エネルギーで動作する脳の高精度な時空間環境認知モデルに基づく、 超低消費電力で動作する脳型人工知能ハードウェア技術の確立

- ・当該低電力消費型 AI システムを活用して、その省エネ性能を生かすハードウェア（専用チップの構築以外にメモリ・電力制御系・制御ファームウェア等を含む。）を設計したシステムを実現すること。当該低電力消費型 AI システムについては、2021 年度時点での既存の人工知能（機械学習や深層学習等）を用いた場合に比べて、1/1000 程度以下の消費電力（概ね 1 W 程度以下）で動作し、また、学習に必要とされるデータ量を 1/100 以下程度として認知理解を実行できることを目標とする。
- ・当該低電力消費型 AI システムの超低消費電力を生かすため、多様なセンサーやネットワークを接続可能かつ小型機器に搭載可能とすること。具体的には、事業終了時に、人間が容易に持ち運べるサイズ（例えば、名刺程度の大きさ）で作動できるものを実現すること。
- ・人工知能処理における各処理工程（例：設計、学習、最適化、識別等）を対象とした消費電力の詳細な比較分析が可能な技術を確立し、既存の人工知能技術（DNN、CNN、RNN 等）と当該低電力消費型 AI システムの消費電力を比較分析するとともに、代替可能性について実証すること。また、例えば、深層学習の前処理として当該低電力消費型 AI システムを活用することで、各人工知能の長所を生かしつつも、省計算資源化・省電力化につながる方法の実証を行うこと。

(注) DNN : DNN (Deep Neural Network) : 多層に積み重ねたニューラルネットワーク

CNN : CNN (Convolutional Neural Network) : 畳み込み演算に基づいた DNN

RNN : RNN (Recurrent Neural Network) : 有向閉路を有するニューラルネットワーク

#### 研究開発成果

・脳型人工知能ソフトウェアモデルを搭載し、120cc 以下の体積に収容（搭載）可能、深層学習の 1/1000 以下の消費電力で動作する脳型 AI システム（モジュール）の実現において、脳型 AI チップの実動作モックアップハードウェア試作並びに消費電力・実証実験による性能評価により推論モデル演算部に近似計算手法を確立し、ハードウェア化による性能向上・消費電力削減効果を確認、119.56cc の体積に収容可能で、深層学習と比較して 1/1000 の消費電力（≒1W）で動作する脳型 AI システムモジュール（チップ）実現の目途を立てた。

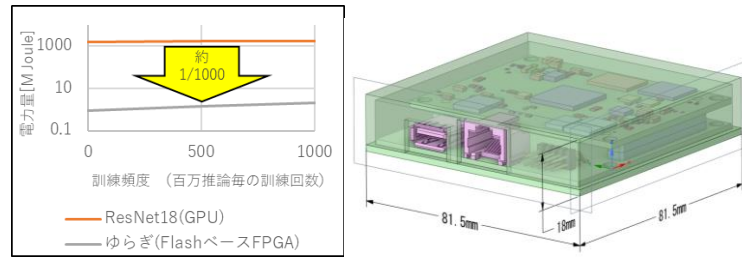


図-8 拡張ゆらぎ学習ハード化による省電力化並びに小型化

・再生（自然）エネルギーによる電源供給も想定した脳型 AI システム環境適応型電力マネジメント技術の確立として、既存エッジ基盤向け電力マネジメント・制御により、従来のチップ電力マネジメント技術に対して電力効率 3 倍の性能・電力比を達成。自然エネルギー変動に適応可能な新アーキテクチャを開発した。

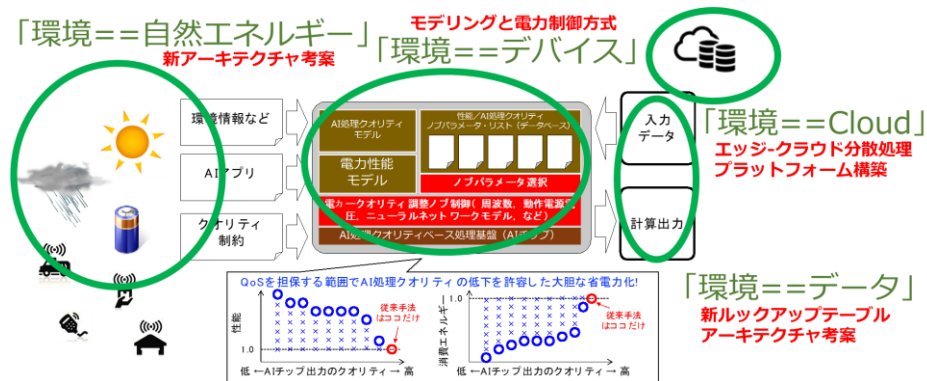


図-9 脳型 AI システム環境適応型電力マネジメント

・工程別・機能別（層別）等人工知能の詳細な消費電力分析を可能とする多分野で活用可能な人工知能消費電力計測・分析技術の確立において、高精度電力測定の基礎技術を確立（特許申請中）し、深層学習や脳型 AI 等の様々な人工知能モデルの電力ベンチマーク分析を可能とするツールとして実現した。さらに本ツールが AI の省エネ設計支援ツールとして有効であることも実証実験を通じて確認した。

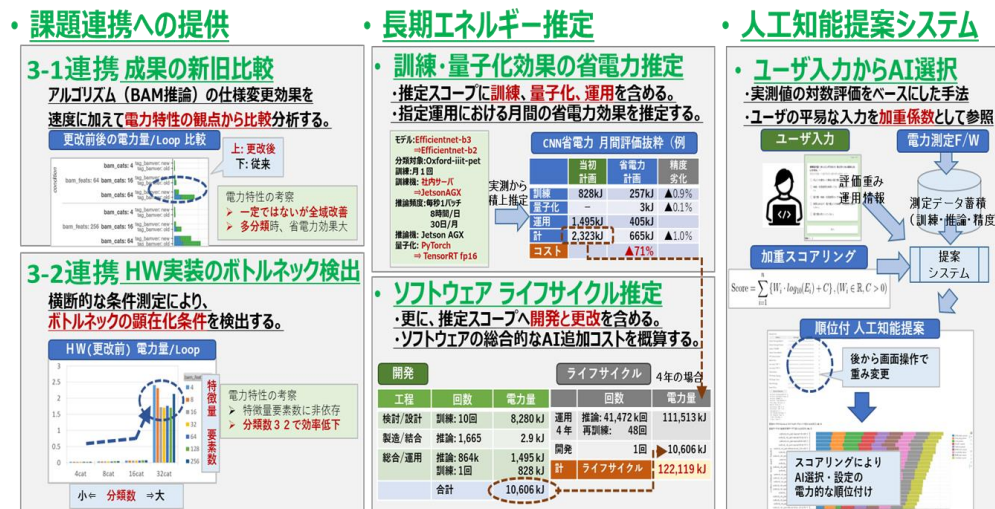


図-10 人工知能高精度省電力計測・分析技術

### 3. 3 超低消費電力型の脳型人工知能システムを用いたサイバー・フィジカルシステムの最適化・省電力化技術の確立

・当該低電力消費型 AI システムを用いて、5G 環境下等でのデータセンター等のサイバーシステムを対象とし、その動作等の最適化を実現するとともに、これらのサイバーシステムの機能を維持しながら省電力化する手法・技術を確立し、その効果について算定すること。また、当該低電力消費型 AI システムが適用可能な範囲、具体的には社会実装可能なポテンシャルやその市場規模についても推計すること。

・当該低電力消費型 AI システムを用いて、多様なフィジカルシステム（例：プラットフォームでのやりとりに対応した物体の移動等が伴う産業活動プロセスや、労働集約的産業で大規模データが取得しにくく大量の学習データを必要とするような、既存の人工知能の適用が難しい産業等）を対象として、そのフィジカルシステムの動作等の最適化を実現するため、当該フィジカルシステムの機能を維持しながら省電力化する手法・技術を確立し、その効果について算定すること。また、当該低電力消費型 AI システムが適用可能な範囲、具体的には社会実装可能なポテンシャルやその市場規模についても推計すること。

（注）サイバーシステム、フィジカルシステムいずれにおいても省電力（CO<sub>2</sub>排出削減）のために追加する当該低電力消費型 AI システムにより増加する消費電力を含めた上で、省電力効果を算定し、省電力効果は実証システムによる実証実験によりその実現性を確認すること。

#### 研究開発成果

・脳型 AI システムの ICT インフラの低消費電力化への適用実証実験を行い、適用前に対して 5%以上の消費電力削減を目指すと同時に脳型 AI システムの有効性を確認。

・サイバーシステムの省エネ化に関して大規模なデジタルツインインフラにおける分散映像分析システムを対象に消費電力モデルを確立、最適化問題を整数線形計画問題モデルして定式化した。このモデルを基に、線形ソルバ（高精度広域最適解の計算）と前述最適解を最適化ターゲットとする脳型 AI（拡張ゆらぎ学習、高速局所最適）との連携によって、静的環境にて総消費電力を 23～27%削減、動的環境にて総消費電力を 8%削減、大規模環境下でロードバランスによる不要機器のシャットダウンにより総消費電力を 50%以上削減、さらに移動ロボット環境においても、総消費電力の 30-50%削減について実証実験を通じて確認した。

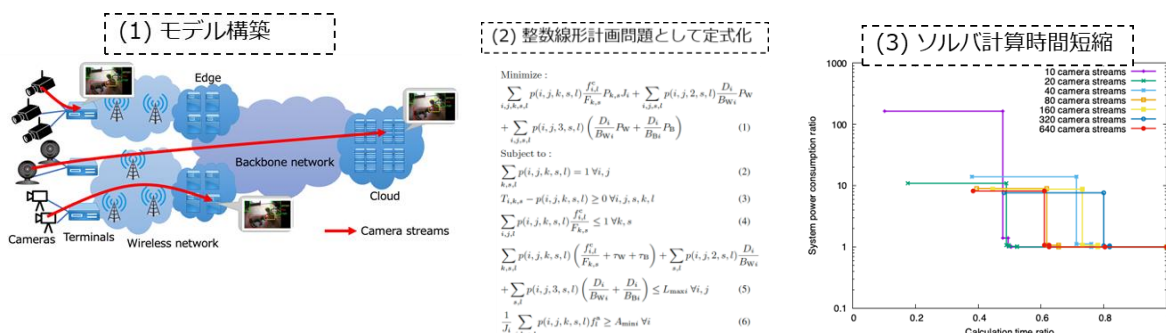


図-11 分散映像分析システムにおける消費電力モデルの構築とソルバによる最適解ターゲット算出

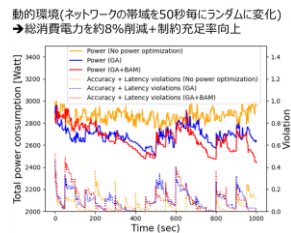
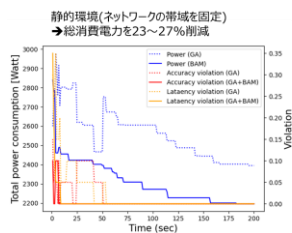
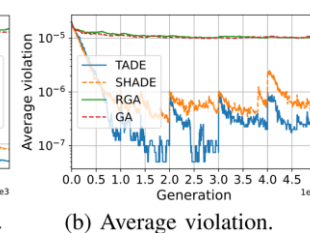
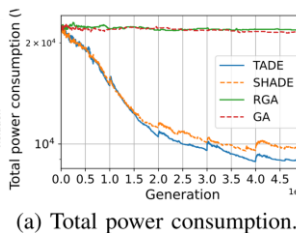


図-12 静的・動的環境での省エネ実証結果



(a) Total power consumption.

(b) Average violation.

図-13 大規模環境での省エネ実証結果

・脳型 AI システムの電気炉製鉄工場への適用実証による有効性確認と 5%以上の消費電力削減フィジカルシステムの省エネ化に関して、電気炉スクラップ製鉄プラントでの溶け落ち判定に脳型人工知能ソフトウェアモデルを用いることで、10 程度の操業データの学習により、炉内スクラップ鉄熔融状態を全操業の 90%以上の操業で推定に成功、令和 5 年度の巡回型三相交流炉を用いた実証実験においては初装工程で平均約 522kWh (7%) の省電力化、約 200kg (東京電力 CO<sub>2</sub> 排出係数 0.376kg-CO<sub>2</sub>/kWh を使用) の CO<sub>2</sub> 削減効果を確認した。

・活用ポテンシャル分野・業種の調査推計に関して電炉スクラップ再生プラントにおける実証実験対象先を 1 プラントから 5 プラントに拡大し研究成果技術の有効性を確認すると同時に、他分野、産業への適用分野拡大に向け調査分析を行い、野生動物監視、産業廃棄物リサイクル処理分野等への活用可能性を確認した。

### 3. 4 研究開発・実証実験を円滑に推進するマネジメント

研究開発全体像を以下の図-14 に示す。

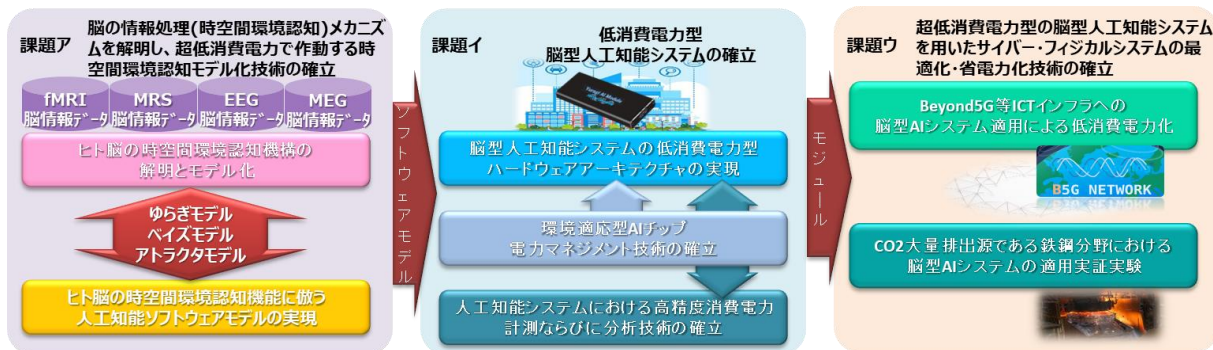


図-14 研究開発全体像

研究開発遂行にあたり、上記の図-14 に示すように課題ア（前述 3.1 に相当）→課題イ（前述 3.2 に相当）→課題ウ（前述 3.3 に相当）の成果連携が前提となる。前課題の成果に対する時間ロスを最小限に抑えると同時に、後課題から前課題へのフィードバックを円滑に進め、アウトプット目標を効率的に達成するために、図-15 に示す課題間の研究内容、課題および成果の連携効果を発揮することで、3 年間の研究期間内に成果を用いた実証実験実施を含め計画通りの進捗を実現、全課題においてアウトプット目標を達成した。

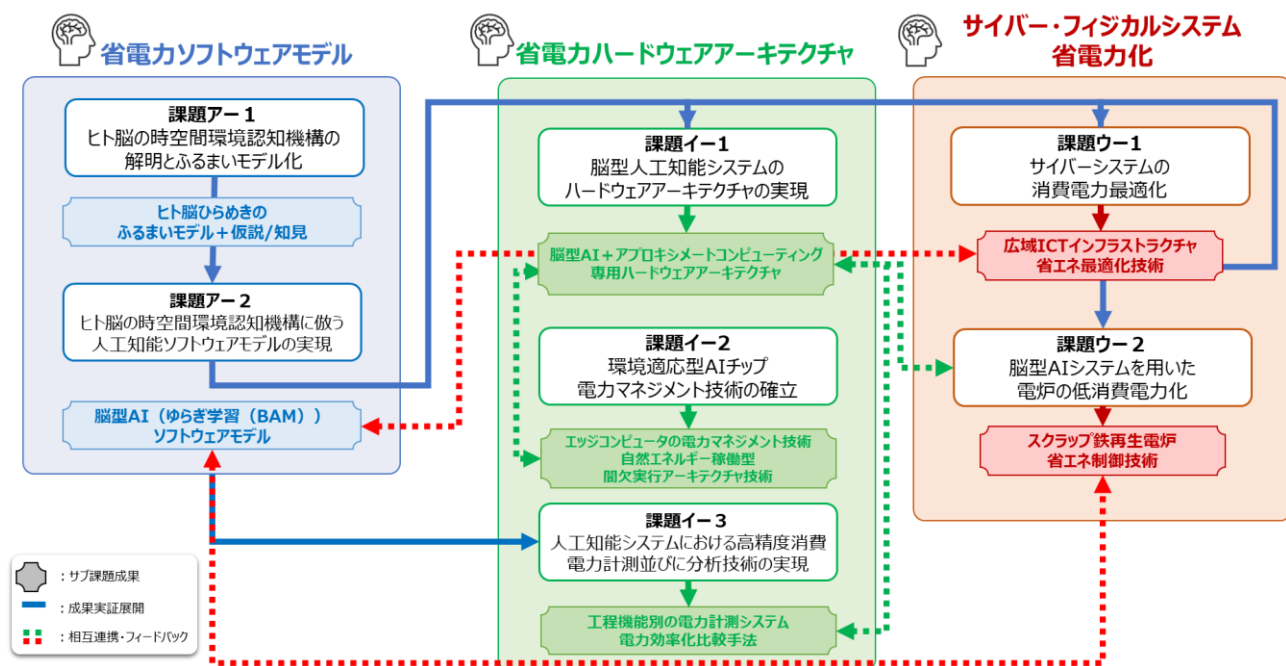


図-15 課題間技術・成果の連携体制

#### 4 政策目標（アウトカム目標）の達成に向けた取組みの実施状況

- ・政策目標（アウトカム目標）とアウトカム指標

政策目標（アウトカム目標）にて示された目標に対してアウトカム指標を設定した。その対応を以下に示す。

|   | 政策目標（アウトカム目標）                                                                                                                   | アウトカム指標                    |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 1 | 情報通信社会のグリーン化を実現し得る次世代人工知能デバイスを実社会に実装するために必要な技術の確立                                                                               | <u>着実な事業化計画と展開戦略の立案・遂行</u> |
| 2 | 脱炭素化に向けて技術的イノベーションから国際社会へ貢献し得る重要な特許・論文等につながる成果を創出                                                                               | <u>重要な特許・論文の創出</u>         |
| 3 | 製品の出口戦略においては、人工知能分野の特性を踏まえ、オープン・クローズ戦略等を適切に用いることにより、国内企業等が低消費電力というユニークな観点で強みを持ち、一定の領域で主導権を確保していくことが可能となる形でグローバルスタンダードの確立へとつなげる。 | <u>国際的展開に必要な取組の実施</u>      |
| 4 | このような取組により、我が国の産業競争力の強化や、国際社会におけるプレゼンスの向上等をはじめとする国際交渉力の強化に資するとともに、政府としての重要課題である日本社会のデジタル化・グリーン化に寄与していく。                         |                            |

- ・政策目標（アウトカム目標）達成に向けたアウトカム指標実現への取り組みと進捗  
アウトカム指標達成に向けた取り組みと進捗について以下に示す。

|   | アウトカム指標と具体的課題                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | アウトカム指標実現への取り組み状況                                                                                                                                                                                                                                 |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | <b><u>アウトプット目標の達成と着実な事業化計画と展開戦略の立案遂行</u></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・技術のオープン化</li> <li>・電炉分野を核とした技術の実用化</li> <li>・業界連携による技術ライセンス拡大</li> </ul>                                                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・基本機能は令和6年8月を目途にGitHubで公開予定</li> <li>・実証実験を1社→5社に拡大、実用化を加速</li> <li>・電炉業界に加え新規に7分野での応用連携実現</li> </ul>                                                                                                      |
| 2 | <b><u>重要な特許・論文の創出</u></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・アカデミアへの普及展開</li> </ul> <b><u>R3～R5年度目標件数</u></b> 特許出願 4(0)<br>特許取得 1(0)<br>査読付き誌上発表論文 6(4)<br>査読付き口頭発表論文 13(7)<br>その他誌上発表 1(0)<br>口頭発表 45(0)<br>報道発表 2(0)<br>※括弧内は海外発表件数<br><br><ul style="list-style-type: none"> <li>・インダストリへの普及展開</li> </ul> | <b><u>R3～R5年度成果件数</u></b> 特許出願 4(1)<br>査読付き誌上発表論文 8(6)<br>査読付き口頭発表論文 16(16)<br>その他誌上発表 2(2)<br>口頭発表 69(4)<br>報道掲載 7(0)<br>受賞 2(1)<br>Web サイト 1(0)<br>※括弧内は海外発表件数<br><ul style="list-style-type: none"> <li>・共同研究案件3件→上記7分野連携（共同研究含）に貢献</li> </ul> |
| 3 | <b><u>国際的展開に必要な取組の実施</u></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・社会周知のための国際学会・展示会でのオープンセミナー開催による産官学研究コミュニティの拡大</li> <li>・国際展示会を通じた産官学利用コミュニティ拡大</li> </ul>                                                                                                                                                    | 国際学会での成果発表 20 件、国際展示会出展 4 回(Nextech2022、EdgeTech2022、Interop2023、CEATEC2023)、オープンセミナー3 回、シンポジウム年 1 回、計 3 回開催、デモ 3 件<br>展示会来場者約 850 名、うち海外来場者数（7 か国 38 名）<br>→上記 7 分野連携（共同研究含）に貢献                                                                  |

- ・基本計画書項目 6（4）その他 特記事項に関する取組

本研究開発の遂行に際して、年 2 回開催の運営委員会とアウトカム関連ミーティングの開催に際しては委託元である総務省に加えて環境省関係部署にも出席を依頼し、研究計画、進捗と成果等について定期的な情報提供と意見交換を実施。研究遂行に際して両省庁の意見等を研究実施内容に適宜、反映を行った。

## 5 政策目標（アウトカム目標）の達成に向けた計画

研究期間終了後に向けたアウトカム目標の達成・拡大に向けた目標と計画について以下に示す。

|   | アウトカム指標                    | 目標年度     | 数値目標等                      | 調査方法                                       | 終了条件                               |
|---|----------------------------|----------|----------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|
| 1 | <u>着実な事業化計画と展開戦略の立案・遂行</u> | 令和 10 年度 | 適用分野・応用領域が 8 分野または 12 応用以上 | 研究期間：共同研究・研究プロジェクトでの利用調査、企業：商談案件により適用分野を調査 | 適用が 8 分野または応用領域が 12 領域を超えた時点で終了    |
| 2 | <u>重要な特許・論文の創出</u>         | 令和 10 年度 | 新規機能 5 件以上                 | 成果の強化高度化に向けた研究開発に対応する論文または特許数              | 新規機能に関する論文または特許が 5 件を超えた時点で終了      |
| 3 | <u>国際的展開に必要な取組の実施</u>      | 令和 10 年度 | GitHub 登録公開・アクセス数 2000 以上  | GitHub アクセスカウンタにてアクセス数、ダウンロード数を調査          | アクセス数 2000 を超えた時点で終了。ただし公開並びに調査は継続 |

### ○アウトカム以外に期待される研究成果

(1) 人工知能研究開発の方向性に新たな指標となりうる「省エネ」「省計算資源」「省データ」の提示  
本研究成果の社会実装とその拡大は、人工知能研究開発の方向性、人工知能の進化の方向性に「省エネ」「省計算資源」「省データ」という新たな指標を示す波及効果が期待される。既に本研究成果はドイツ・ボンで令和 5 年年 5 月に開催された Sustainable AI Conference 2023 に人工知能研究開発というテーマで唯一、採択され、評価されたという実績を有している。

(2) 社会における DX 化普及の加速

従来、莫大な投資や専門家の確保が困難なためにデータ不足、計算機資源不足、技術力不足により AI を用いた DX 化が困難であった分野・領域に AI 適用による DX 化実現に寄与できることが期待できる。

(3) ベテランの経験と勘に依存し、ベテラン技能者の高齢化に直面する産業分野に技術継承の機会を提供

電気炉溶け落ち判断に代表されるような属人的技能に依存する技能が要求される産業分野において脳型 AI がベテラン技能者の暗黙知を学習し、形式知として再現することで「技能の再現」及び「技能の継承」の実現に寄与することが期待できる。

## 6 査読付き誌上発表論文リスト

- [1] Yusuke Morido and Ben Murata, “Accumulation System: Distributed Neural Substrates of Perceptual Decision Making Reveal by fmri Deconvolution”、Journal of Neuroscience 42(24) pp4891-4912, (2022/6/15):
- [2] Madoka Yamashita Tetsuya Shimokawa and Rumi Tanemura, "Default mode network-associated intrinsic connectivity relates to individual learnability differences in errorless and trial-and-error learning", Applied neuropsychology. Adult 2022 Aug 23:1-9. doi: 10.1080/23279095.2022.2111518 (2022/8/23) :
- [3] Kazufumi Hosoda Shigeto Seno and Tsutomu Murata, ”Simulation Reaction Time for Eureka Effect in Virtual Object Recognition Using Artificial Neural Network”IIAI Letters on Information and Interdisciplinary Research Vol 003, LIIR060 <https://doi.org/10.52731/liir.v003.060> (2023/2/17):
- [4] Yuuki Matsushita, and Kunihiko Kaneko, “Generic optimization by fast chaotic exploration and slow feedback fixation”、Physical Review Research 5, 023017 (2023/4/10):
- [5] Kuan Yi Ng, Aalaa M.A. Babai, Teruo Tanimoto, Satoshi Kawakami, and Koji Inoue, “Empirical Power-Performance Analysis of Layer-wise CNN Inference on Single Board Computers” IPSJ ACS 論文誌, (2023/7/1)
- [6]Kuan Yi Ng, Aalaa M.A. Babai, Teruo Tanimoto, Satoshi Kawakami, and Koji Inoue, “Empirical Power-Performance Analysis of Layer-wise CNN Inference on Single Board Computers,” IPSJ JIP, pp.478-494,(2023/8/1) :
- [7] Tomoki Kurikawa, and Kunihiko Kaneko、 “Solvable neural network model for input-output associations: Optimal recall at the onset of chaos”、Physical Review Research 5, 043221 (2023/12/8):
- [8] Kohei Ichikawa and Kunihiko Kaneko, ” Bayesian inference is facilitated by modular neural networks with different time scales” PLOS Computational Biology 20(3): e1011897(2024/3/13):

## 7 査読付き口頭発表論文（印刷物を含む）リスト

- [1] Kuan Yi Ng Aalaa M.A. Babai Satoshi Kawakami Teruo Tanimoto and Koji Inoue, “Layer-wise power/performance analysis for single-board CNN inference”、The 6th cross-disciplinary Workshop on Computing Systems, Infrastructures, and Programming (2022/7/27) :
- [2] Satoshi Matsushita Teruo Tanimoto Satoshi Kawakami Takatsugu Ono, and Koji Inoue, “An Edge Autonomous Lamp Control with Camera Feedback”、IEEE 8th World Forum on Internet of Things (2022/10/31):
- [3] Yuan Wang Hidetomo Shibamura Kuan Yi Ng and Koji Inoue, “The Implementation of Edge-cloud Cooperative CNN Inference on an IoT Platform,” IEEE International Symposium on Embedded Multicore/Many-core Systems-on-Chip (2022/12/20):
- [4] Tatsuya Otsu, Masayuki Murata, Hideyuki Shimonishi and Tetsuya Shimokawa, ” Hierarchical Bayesian Attractor Model for Dynamic Task Allocation in Edge-Cloud Computing”、International Conference on Computing, Networking and Communications (2023/2/20):
- [5] Tatsuya Otsu, Masayuki Murata, ” Evolutionary Algorithm with Phenotype Diversity for Virtual Network Embedding”、International Conference on Computing, Networking and Communications (2023/2/22):

- [6] Nattaon Techasartikul Koichi Owaki and Hideyuki Shimonishi, "Effective of environment-aware interfaces on the task performance in a workspace setting", The 6<sup>th</sup> international workshop on Virtual, Augmented, and Mixed-Reality for Human-Robot Interactions 2023(2023/3/13):
- [7] Hideyuki Shimonishi Masayuki Murata Go Hasegawa and Nattaon Techasartikul, "Energy Optimization of Distributed Video Processing System using Genetic Algorithm with Bayesian Attractor Model", 9th IEEE International Conference on Network Softwarization (2023/6/20):
- [8] Tatsuya Otsu Masayuki Murata Hideyuki Shimonishi and Tatsuya Shimonkawa, "Distributed Timeslot Allocation in mMTC Network by Magnitude-Sensitive Bayesian Attractor Model", 9th IEEE International Conference on Network Softwarization (2023/6/21):
- [9] Kuan Yi Ng and Koji Inoue, "A Preliminary Case Study on Hardware Upgrade Cycle and Carbon Emissions of Supercomputer", ACM Student Research Competition(2023/10/12):
- [10] Aalaa M. A. Babai and Koji Inoue, "Quantifying Performance Opportunities of Novel Non-volatile FPGAs for Accelerating Energy-Constrained Intelligent IoT", ACM Student Research Competition (2023/10/12):
- [11] Chanseok Lim Keigo Nishida Shigeto Seno Tsutomu Murata Izumi Ohzawa and Kazufumi Hosoda, "Insights from Artificial Neural Networks on Generalization of Color Information in Object Recognition", Society for Neuroscience "Neuroscience 2023" (2023/11/13):
- [12] Hidetomo Shibamura Yoshimitsu Okayama and Koji Inoue, "An IoT platform "My-IoT" and its enhancement", The 25th Workshop on Synthesis And System Integration of Mixed Information technologies (2024/3/1):
- [13] Hideyuki Shimonishi Masayuki Murata Nattaon Techasartikul and Yang Lou, "Energy Optimization of Distributed Video Processing System in Dynamic Environment", IEEE Consumer Communications & Networking Conference (2024/1/8):
- [14] Daiki Kodama Kenji Ohira Hideyuki Shimonishi Toshio Nakahira Daisuke Murayama and Tomoaki Ogawa, "Enhancing Indoor Millimeter Radio Communication: A Probabilistic Approach to RSS Map Estimation" IEEE Consumer Communications & Networking Conference (2024/1/8):
- [15] Seishiro Inoue Masayuki Yamauchi Daichi Kominami Hideyuki Shimonishi and Masayuki Murata, "Genetic Algorithm with Gene Regulatory Networks based Optimization Method for Distributed Video Analysis System", 27<sup>th</sup> Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks (2024/3/11):
- [16] Nattaon Techasartikul Hideyuki Shimonishi and Masayuki Murata, "A Simulation of Energy Optimized Distributed Video Processing on 28 GHz Network", 27<sup>th</sup> Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks (2024/3/11):

## 8 その他の誌上発表リスト

- [1] Kazufumi Hosoda Shigeto Seno and Tsutomu Murata, "Simulation Reaction Time for Eureka Effect in Virtual Object Recognition Using Artificial Neural Network" arXiv:2207.00855v1[cs.LG] (2022/6/30)
- [2] Kazufumi Hosoda Keigo Nishida Shigeto Seno Tomohiro Mashita Hideki Kashioka and Izumi Ohzawa, "

It's DONE:Direct ONE-shot learning without training optimization”、arXiv:2204.13361v3[cs.LG] (2022/11/2)

## 9 口頭発表リスト

- [1] 村田勉 下川哲也 細田一史 柏岡秀紀 加納敏行、“ヒト脳の「ひらめき」に着目した時空間環境認知メカニズムのふるまいモデル構築”、GREEN AI CHALLENGE 2022 シンポジウム (オンライン) (2022/2/22)
- [2] 鈴木利一、“脳型人工知能を活用した電気炉製鋼の省エネルギー化実現”、GREEN AI CHALLENGE 2022 シンポジウム (オンライン) (2022/2/22)
- [3] 田野岡貴之 奥村慎一 日下部辰馬 吉岡剛史 成澤孝悦、“脳型人工知能システムの低消費電力型ハードウェアアーキテクチャの実現”、GREEN AI CHALLENGE 2022 シンポジウム (オンライン) (2022/2/22)
- [4] 渡辺徹 江川耕平 荒井俊貴 大室孝司 鈴木利一、“深層学習並びにゆらぎ学習の処理工程・機能ごとの高精度な消費電力測定手法”、GREEN AI CHALLENGE 2022 シンポジウム (オンライン) (2022/2/22)
- [5] 江川耕平 渡辺徹 荒井俊貴 大室孝司 鈴木利一、“再生鉄製造用電気炉から収集した環境データとスクラップ溶け落ちタイミングの相関性分析”、GREEN AI CHALLENGE 2022 シンポジウム (オンライン) (2022/2/22)
- [6] 井上弘士、“環境適応型 AI チップ電力マネジメント技術の確立に向けて”、GREEN AI CHALLENGE 2022 シンポジウム (オンライン) (2022/2/22)
- [7] 加納敏行、“ヒト脳の省エネ・ロバスト性に倣う人工知能”ゆらぎ学習“実現&高度化への挑戦”、GREEN AI CHALLENGE 2022 シンポジウム (オンライン) (2022/2/22)
- [8] 大歳達也 加納敏行 村田正幸、“生命・脳の情報処理メカニズムに倣う省エネな予測認知モデルの実現とその応用” GREEN AI CHALLENGE 2022 シンポジウム (オンライン) (2022/2/22)
- [9] 下西英之 村田正幸 長谷川剛、“分散映像分析システムの消費電力最適化方式の検討”、GREEN AI CHALLENGE 2022 シンポジウム (オンライン) (2022/2/22)
- [10] 長谷川剛 下西英之 村田正幸、“集中制御によるサイバーシステムの消費電力最適化”、GREEN AI CHALLENGE 2022 シンポジウム (オンライン) (2022/2/22)
- [11] Kuan Yi Ng, Aalaa M.A. Babai Satoshi Kawakami Teruo Tanimoto and Koji Inoue、“Layer-wise power/performance modelling for single-board CNN”、第 240 回システム・アーキテクチャ・第 198 回システムと LSI の設計技術・第 59 回組込みシステム合同研究発表会(オンライン) (2022/3/10)
- [12] 長谷川剛 下西英之 村田正幸、“サイバーシステム構築のためのセンサデータ収集・処理における消費電力最適化に関する一検討”、電子情報通信学会ネットワークシステム研究会 (オンライン) (2022/3/11)
- [13] 下西 英之 小南大智 関良我 村田正幸、“Beyond 5G ビジョンと確率的デジタルツイン”、電子情報通信学会総合大会 (オンライン) (2022/3/17)
- [14] Kuan Yi Ng Aalaa M.A. Babai Satoshi Kawakami Teruo Tanimoto and Koji Inoue、“Layer-wise power/performance analysis for single-board CNN inference”、The 6th cross-disciplinary Workshop on Computing Systems, Infrastructures, and Programming (山口県下関市) (2022/7/27)
- [15] Yuan Wang Hidetomo Shibamura and Koji Inoue、“Implementation of Edge-Cloud Cooperative CNN Inference on an IoT Platform and Its Performance Analysis”、第242回 システム・アーキテクチャ研究発表会 (秋田県湯沢市) (2022/10/11)
- [16] Aalaa M.A. Babai Kuan yi Ng Teruo Tanimoto Satoshi Kawakami and Koji Inoue、“Non-Volatile FPGA-based Intermittent Computing and Its Performance Analysis”、第242回 システム・アーキテクチャ

ャ研究発表会（秋田県湯沢市）（2022/10/12）

[17] Satoshi Matsushita Teruto Tanimoto Satoshi Kawakami Takatsugu Ono and Koji Inoue, “An Edge Autonomous Lamp Control with Camera Feedback”, IEEE 8th World Forum on Internet Things（神奈川県横浜市）（2022/10/31）

[18] 加納敏行, “脳型AI「ゆらぎ学習」とゆらぎ学習を用いた汎用データ分析基盤「YGAP」概要説明” EdgeTech+2022（神奈川県横浜市）（2022/11/17）

[19] 下西英之 村田正幸 長谷川剛, “分散映像分析システムの消費電力最適化方式の検討”, 電子情報通信学会CQ研究会（福岡県博多市）（2022/11/24）

[20] 長谷川剛, “Beyond 5G/6Gのためのエッジコンピューティングに基づくネットワーク・アプリケーション制御技術に関する研究”, 電子情報通信学会無線通信システム研究会（愛知県名古屋市）（2022/12/16）

[21] Yuan Wang Hidetomo Shibamura Kuan Yi Ng and Koji Inoue, “Implementation of Edge-cloud Cooperative CNN Inference on an IoT Platform”, The 15th IEEE International Symposium on Embedded Multicore/Many-core Systems-on-Chip(Penang, Malaysia)(2022/12/20)

[22] 細田 一史 西田 圭吾 瀬尾 茂人 間下 以大 柏岡 秀紀大 澤 五住, “脳のへブ則を模した高性能省エネのワンショット学習”, GREEN AI CHALLENGE 2023シンポジウム（東京都内）（2023/2/24）

[23] 村田勉 下川哲也 細田一史 柏岡秀紀 加納敏行 柳田敏雄, “ヒト脳の「ひらめき」メカニズム：非線形モデルと脳活動計測の進展”, GREEN AI CHALLENGE 2023シンポジウム（東京都内）（2023/2/24）

[24] 木村 美紗子 瀬尾 茂人 村田 勉 細田 一史, “人工ニューラルネットワークを用いたヒトの隠し絵認識におけるヒラメキまでの時間の再現”, GREEN AI CHALLENGE 2023シンポジウム（東京都内）（2023/2/24）

[25] 吉岡剛史 成澤孝悦 日下部辰馬 奥村慎一 田野岡貴之, “脳型人工知能システムの低消費電力型ハードウェアアーキテクチャの実現”, GREEN AI CHALLENGE 2023シンポジウム（東京都内）（2023/2/24）

[26] 渡辺徹、鈴木利一, “AI消費電力計測 ソフトウェアベースの電力測定ツールデモ”, GREEN AI CHALLENGE 2023シンポジウム（東京都内）（2023/2/24）

[27] 江川耕平 鈴木利一 渡辺徹, “再生鉄製造用電気炉から収集した環境データとスクラップ溶け落ちタイミングの相関性分析”, GREEN AI CHALLENGE 2023シンポジウム（東京都内）（2023/2/24）

[28] 井上弘士, “低消費エネルギーAI処理基盤技術と応用展開”, GREEN AI CHALLENGE 2023シンポジウム（東京都内）（2023/2/24）

[29] 村田正幸, “ヒト脳のひらめき機構に倣う人工知能の開発”, GREEN AI CHALLENGE 2023シンポジウム（東京都内）（2023/2/24）

[30] 下川哲也, “脳のゆらぎに倣うグリーンAI「ゆらぎ学習」の開発”, GREEN AI CHALLENGE 2023シンポジウム（東京都内）（2023/2/24）

[31] 加納敏行, “脳に倣う人工知能「ゆらぎ学習」を用いたデジタル&グリーントランスフォーメーションへの取り組み”、GREEN AI CHALLENGE 2023シンポジウム（東京都内）（2023/2/24）

[32] 加納敏行, “脳の仕組みに倣った省エネ型の人工知能関連技術の研究開発”, GREEN AI CHALLENGE 2023シンポジウム（東京都内）（2023/2/24）

[33] 下川哲也 島田孝徳 加納敏行, “脳型人工知能技術 ゆらぎ学習”, GREEN AI CHALLENGE 2023シンポジウム（東京都内）（2023/2/24）

[34] 加納敏行 下川哲也 島田孝徳, “ゆらぎ学習データ分析プラットフォーム”YGAP”, GREEN AI CHALLENGE 2023シンポジウム（東京都内）（2023/2/24）

- [35] 下西英之 長谷川剛、“AI画像分析を分散処理最適化で低消費電力化”、GREEN AI CHALLENGE 2023 シンポジウム（東京都内）（2023/2/24）
- [36] 長谷川剛 下西英之 村田正幸、“デジタルツインのためのセンサデータ収集・処理の最適化における計算時間短縮手法と観測誤差が与える影響の評価”、電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会（沖縄県那覇市）（2023/3/17）
- [37] Hideyuki Shimonishi、“Probabilistic Digital-Twin Towards B5G/6G System Management and Applications”、The 1<sup>st</sup> Germany-Japanese Beyond 5G/6G Research Workshop（東京都小金井市）（2023/4/24）
- [38] Tetsuya Shimokawa、“Brain-inspired energy-saving frameworks: green of AI and green by AI”、2nd International Conference: "Sustainable AI Across Borders"、(Hamburg, Germany) (2023/5/30)
- [39] Koji Inoue、“Toward Edge-Cloud Energy Efficient AI Accelerations”、International Forum on Multicore and Multiprocessor SoCs (Montaba, USA) (2023/6/27)
- [40] 井上誠士郎 山内雅明 小南大智 下西英之 村田正幸、“遺伝子制御ネットワークを用いた分散型映像分析システムの消費電力最適化方式”、電子情報通信学会 ネットワークシステム研究科(NS) (宮城県仙台市) (2023/9/8)
- [41] 武士拓実 大平健司 下西英之、“屋内ミリ波ビームフォーミングにおけるガウス過程回帰を利用したLOS/NLOS 推定”、電子情報通信学会超知性ネットワークングに関する分野横断型研究会（北海道札幌市）（2023/10/31）
- [42] 長谷川剛、“Beyond 5G/6G アプリケーションのためのエッジ・クラウドコンピューティングに基づく制御技術に関する研究”、電子情報通信学会スマート無線研究会（宮城県仙台市）（2023/11/15）
- [43] Zhengpan Fei and Koji Inoue、“Preliminary Data-Pattern Analysis towards Energy-Efficient Adaptive In-Cache Computing for CNNs Acceleration”、集積回路研究専門委員会(デザインガイア 2023) /電子情報通信学会（熊本県熊本市）（2023/11/15）
- [44] 柴村 英智 井上 弘士 岡山 義光、“IoT プラットフォーム「My-IoT」とその応用展開”、集積回路研究専門委員会(デザインガイア 2023) /電子情報通信学会（熊本県熊本市）（2023/11/15）
- [45] 児玉大輝 大平健司 下西英之 中村俊朗 村山大輔 小川智明、“ローカル 5G 環境におけるミリ波通信電波状況の確率的推測”、電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会（愛媛県松山市）（2023/11/21）
- [46] Kuan Yi Ng Takeshi Nanri Teruo Tanimoto Satoshi Kawakami and Koji Inoue、“Analyzing Carbon Footprint Implications of Hardware Replacement: Preliminary Evaluation Targeting CPUs in Supercomputer Systems”、システム・アーキテクチャ研究会/情報処理学会（沖縄県那覇市）（2023/12/5）
- [47] 細田一史 村田勉 林燦碩 西田圭吾 瀬尾茂人 柏岡秀紀 大澤五住 金子邦彦、“ヒト脳の時空間環境認知機構のモデル化と超省エネ計算機にむけたモデル化”、GREEN AI CHALLENGE 2024シンポジウム（東京都内）（2024/1/16）
- [48] 村田勉 下川哲也 細田一史 柏岡秀紀 加納敏行<sup>2</sup> 國重小巻 柳田敏雄、“ヒト脳の時空間環境認知機構の解明:「ひらめき」の脳メカニズム” GREEN AI CHALLENGE 2024シンポジウム（東京都内）（2024/1/16）
- [49] 林燦碩 西田圭吾 瀬尾茂人 村田勉 大澤五住 細田一史、“ヒト脳の時空間環境認知機構の解明: 物体認識モデルの解析から見るヒト脳の色情報処理の高度さ”、GREEN AI CHALLENGE 2024シンポジウム（東京都内）（2024/1/16）
- [50] 鈴木利一、“脳型AI技術を活用した電炉省エネ化の実現”、GREEN AI CHALLENGE 2024シンポジウム（東京都内）（2024/1/16）
- [51] 吉岡剛史 成澤孝悦 大西慧太郎 北野勇太 沼田宜宏、“脳型人工知能システムの低消費電力型ハードウェアアーキテクチャの実現”、GREEN AI CHALLENGE 2024シンポジウム（東京都内）（2024/1/16）
- [52] 渡辺徹 亀井宏 鈴木利一、“人工知能システムにおける高精度消費電力計測ならびに分析技術の確立”、GREEN AI CHALLENGE 2024シンポジウム（東京都内）（2024/1/16）
- [53] 江川耕平 渡辺徹 鈴木利一、“再生鉄製造用電炉から収集した環境データを用いたスクラップ溶け落ちタイミングの推定とその効果”、GREEN AI CHALLENGE 2024シンポジウム（東京都内）（2024/1/16）

- [54] 井上弘士 吉岡剛史 北野勇太 渡辺徹 亀井宏、“低消費エネルギーAI処理基盤技術と応用展開”、GREEN AI CHALLENGE 2024シンポジウム（東京都内）（2024/1/16）
- [55] 柴村英智 井上弘士、“環境指向AI-IoTコンピューティング”、GREEN AI CHALLENGE 2024シンポジウム（東京都内）（2024/1/16）
- [56] 島田孝徳、下川哲也、加納敏行、“「ゆらぎ学習」活用フレームワークYGAPとその応用”、GREEN AI CHALLENGE 2024シンポジウム（東京都内）（2024/1/16）
- [57] 下川哲也 大歳達也 加納敏行、“ヒト脳の知覚意思決定機構に倣う時空間勘定認知モデル「ゆらぎ学習」”、GREEN AI CHALLENGE 2024シンポジウム（東京都内）（2024/1/16）
- [58] TECHASARNTIKUL NATTAON 下西英之、“分散映像分析システムの処理最適化による消費電力削減” GREEN AI CHALLENGE 2024シンポジウム（東京都内）（2024/1/16）
- [59] 下西英之、“分散映像分析システムの処理最適化による消費電力削減脳に倣った省エネ型の人工知能関連技術の研究開発[ ] 加納敏行、“脳に倣った省エネ型の人工知能関連技術の研究開発” GREEN AI CHALLENGE 2024シンポジウム（東京都内）（2024/1/16）
- [60] 加納敏行 柏岡秀紀 村田勉 細田一史、“ヒト脳の「ひらめき機構」の解明と人工的再現への挑戦” GREEN AI CHALLENGE 2024シンポジウム（東京都内）（2024/1/16）
- [61] 加納敏行 鈴木利一、“「ゆらぎ学習」アウトカムに向けた取り組み ～今後の展開” GREEN AI CHALLENGE 2024シンポジウム（東京都内）（2024/1/16）
- [62] 長谷川剛、“集中制御によるサイバーシステムの消費電力最適化”、GREEN AI CHALLENGE 2024シンポジウム（東京都内）（2024/1/16）
- [63] 下西英之 小南大智 大下裕一、“ローカル 5G・デジタルツインテストベット”、大阪大学先導的学際研究機構 DX 社会研究部門シンポジウム（大阪府吹田市）（2024/1/24）
- [64] TECHASARNTIKUL NATTAON 下西英之、“分散映像分析システムの処理最適化による消費電力削減”、大阪大学先導的学際研究機構 DX 社会研究部門シンポジウム（大阪府吹田市）（2024/1/24）
- [65] 徐詩豪 大平健司 下西英之、“ミリ波を用いた TCP 通信の品質に影響を与える要因の分析”、電子情報通信学会ネットワークシステム研究会（2024/1/26）
- [66] 井上誠士郎 山内雅之 小南大智 下西英之 2 村田正幸、“生物の遺伝子制御機構に基づくネットワーク帯域幅の変動に適応可能な分散型映像分析システム消費電力最適化方式”、電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会(IN)（沖縄県宜野湾市）（2024/3/1）
- [67] 長谷川剛、“ILP ソルバと発見的手法の組み合わせによる動画像ストリームデータのリアルタイム AI 処理内容の決定手法” 電子情報通信学会総合大会（広島県東広島市）（2024/3/6）
- [68] 柴村 英 ,井上 弘士、“環境適応AI/IoTコンピューティング”、第248回ARC研究発表会（ETNET2024）/情報処理学会（長崎県壱岐市）（2024/3/21-22）
- [69] Aalaa M.A. and Koji Inoue、“Get your Accelerator ASAP: Almost Application Specific Accelerators Paths”、the ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, WACI session（Vancouver, Canada）（2023/3/26）

## 10 出願特許リスト

- [1] 細田一史 柏岡秀紀、学習装置、機械学習プログラム、および機械学習方法、日本、2023/7/4
- [2] 細田一史 柏岡秀紀、自己符号化を行うシステム、プログラム、および方法、日本、2023/9/15
- [3] 渡辺徹 鈴木利一、AI 搭載 PC 装置の消費電力計測装置、日本、2023/10/9
- [4] 細田一史 柏岡秀紀、自己符号化を行うシステム、プログラム、および方法、日本を除くすべての指定国、2023/8/24

## 1 1 取得特許リスト

なし

## 1 2 国際標準提案・獲得リスト

なし

## 1 3 参加国際標準会議リスト

なし

## 1 4 受賞リスト

[1]Kazufumi Hosoda Shigeto Seno and Tsutomu Murat、Besut Crowd Award・KICSS2022、“Simulation Reaction Time for Eureka Effect in Virtual Object Recognition Using Artificial Neural Network”、2022/10/25

[2]児玉大輝、電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会 学生優秀発表賞、“ローカル 5G 環境におけるミリ波通信電波状況の確率的推測”、電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会（愛媛県松山市）（2023/11/21）

## 1 5 報道発表リスト

（１）報道発表実績

なし

（２）報道掲載実績

[1] “千代田鋼鉄工業社での脳型 AI の実証実験開始、実施内容”、産業新聞、2023/6/7

[2] “AI が変える電炉(上)”、産業新聞、2023/6/8

[3] “AI が変える電炉(下)”、産業新聞、2023/6/9

[4] “電炉業界での脳型 AI による溶け落ち制御による省エネ化”、日本経済新聞、2023/9/1

[5] “阪大発 AI の溶解判断”、産業新聞、2023/12/26

[6] “電炉業界の DX 化での脳型 AI の活用”、産業新聞、2024/1/10

[7] “脳型 AI 研究発表 電気炉での実証説明 “、産業新聞、2024/1/18

## 1 6 ホームページによる情報提供

研究課題ホームページ：Green AI Challenge

URL: <https://green-ai-challenge.com/>、研究開発課題概要、実施体制、研究概要および発表文献、総アクセス数:1600

### 研究開発による成果数

|                         | 令和3年度   | 令和4年度   | 令和5年度    |
|-------------------------|---------|---------|----------|
| 査読付き誌上発表論文数             | 0件（0件）  | 3件（3件）  | 5件（3件）   |
| 査読付き口頭発表論文数<br>（印刷物を含む） | 0件（0件）  | 6件（6件）  | 10件（10件） |
| その他の誌上発表数               | 0件（0件）  | 2件（2件）  | 0件（0件）   |
| 口頭発表数                   | 13件（0件） | 23件（1件） | 33件（3件）  |
| 特許出願数                   | 0件（0件）  | 3件（0件）  | 1件（1件）   |
| 特許取得数                   | 0件（0件）  | 0件（0件）  | 0件（0件）   |
| 国際標準提案数                 | 0件（0件）  | 0件（0件）  | 0件（0件）   |
| 国際標準獲得数                 | 0件（0件）  | 0件（0件）  | 0件（0件）   |
| 受賞数                     | 0件（0件）  | 1件（1件）  | 1件（0件）   |
| 報道発表数                   | 0件（0件）  | 0件（0件）  | 0件（0件）   |
| 報道掲載数                   | 0件（0件）  | 0件（0件）  | 7件（0件）   |

|                         | 合計       |
|-------------------------|----------|
| 査読付き誌上発表論文数             | 8件（6件）   |
| 査読付き口頭発表論文数<br>（印刷物を含む） | 16件（16件） |
| その他の誌上発表数               | 2件（2件）   |
| 口頭発表数                   | 69件（4件）  |
| 特許出願数                   | 4件（1件）   |
| 特許取得数                   | 0件（0件）   |
| 国際標準提案数                 | 0件（0件）   |
| 国際標準獲得数                 | 0件（0件）   |
| 受賞数                     | 2件（1件）   |
| 報道発表数                   | 0件（0件）   |
| 報道掲載数                   | 7件（0件）   |