

様式 F-7-1

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）実施状況報告書（研究実施状況報告書）（令和元年度）

|          |               |           |      |       |
|----------|---------------|-----------|------|-------|
| 所属研究機関名称 | 奈良先端科学技術大学院大学 |           | 機関番号 | 14603 |
| 研究代表者    | 部局            | 先端科学技術研究科 |      |       |
|          | 職             | 客員教授      |      |       |
|          | 氏名            | 木村 瞳      |      |       |

1. 研究種目名 基盤研究(C)(一般)

2. 課題番号

19K11876

3. 研究課題名 単一アナログデバイスと局所的学習則を用いるリアルニューロモーフィックシステム

4. 補助事業期間 令和元年度～令和3年度

## 5. 研究実績の概要

人工知能は、未来の社会の中心となる技術であるが、巨大なサイズと膨大な電力が問題である。ニューロモーフィックシステムは、脳の模倣で、コンパクト化・低消費電力化が期待できる。そこで、我々は、超コンパクト・超低パワーの『リアルニューロモーフィックシステム』の研究を、アーキテクチャ：単一アナログデバイス / マテリアル：アモルファス金属酸化物半導体 / アルゴリズム：局所的学習則の3つの観点から進めている。本研究では、上記の新技术を導入したニューロモーフィックシステムの動作を、シミュレーション・実機で確認し、実用的かつ人間の脳と同様な超コンパクト・低パワーの汎用人工知能の可能性を検討する。

今まで、シミュレーションでは、抵抗変化素子・メモリスタのモデリングを行い、局所学習則とともに組み込んだ論理シミュレーションを行った。ディープ・畳み込みニューラルネットなどを構築し、連想記憶・画像認識の例として、MNIST・CIFAR-10の文字・画像のデータセットで、一定の認識成功率を達成した。一方、実機では、アモルファス金属酸化物のIn-Ga-Zn-O(IGZO)・Ga-Sn-O(GTO)で、抵抗変化素子・メモリスタの作製に成功し、クロスポイントチップやLSI積層チップなどを用いて動作を確認した。

今後は、シミュレーションでは、強誘電体キャパシタのモデリングを行い、論理シミュレーションを行う。さらに、回路シミュレーションで、動的拳動も含む正確な動作を解析する。一方、実機では、Ba-La-Ti-O(BLT)で、クロスポイントチップやLSI積層チップなどを用いて動作を確認する。最後に、大規模化では、大規模の1兆素子程度のニューロモーフィックシステムを想定し、超コンパクト・超低パワーの人工知能の実現にむけての可能性も検討し、汎用人工知能としての動作を評価する。

## 6. キーワード

アナログデバイス 局所的学習則 ニューロモーフィックシステム

## 7. 現在までの進捗状況

区分 (2) おおむね順調に進展している。

## 理由

まず、シミュレーションでは、単一アナログデバイスである抵抗変化素子・メモリスタのモデリングを行った。印加電圧・電流の履歴にコンダクタンスが依存するモデルである。そして、抵抗変化素子・メモリスタのモデルを局所学習則とともに組み込んだ論理シミュレーションを行った。中規模のニューロモーフィックシステムを想定し、ディープニューラルネット・畳み込みニューラルネットなどのネットワーク構成を構築した。連想記憶・画像認識の例として、MNIST・CIFAR-10の文字・画像のデータセットを用いて、一定の認識成功率を達成した。これらの結果については、早々に研究発表を行う予定である。

つぎに、実機では、アモルファス金属酸化物のIGZO・GTO（いずれも我々が研究している高機能材料）で、組成・デバイス構造・製造プロセスなどの最適化で抵抗変化特性・遷移特性などを制御し、抵抗変化素子・メモリスタとして活用できるものを作製に成功した。シナプス素子だけ個別基板に集積化したクロスポイントチップや、ニューロン素子をLSIに集積化しそのうえにシナプス素子を成膜したLSI積層チップなどを用いて、実機を試作して動作を確認した。現在は、3x3画素の小サイズの文字認識であるが、基本的な動作確認に成功したといえる。これらの結果については、早々に研究発表を行う予定である。また、BLTで、やはり組成・デバイス構造・製造プロセスなどの最適化で強誘電性などを制御し、強誘電体キャパシタとして活用できるものを作製に成功した。シナプス素子の接続強度の初期値・変化速度の実際の値についても評価した。

## 8. 今後の研究の推進方策

まず、シミュレーションでは、単一アナログデバイスである強誘電体キャパシタのモデリングを行う。印加電圧の履歴に分極・キャパスタンスが依存するモデルである。そして、既に完成している抵抗変化素子・メモリスタのモデルを局所学習則とともに組み込んだ論理シミュレーションを行う。より大規模のニューロモーフィックシステムを想定し、ディープニューラルネット・畳み込みニューラルネット・リザーバニューラルネットなどのネットワーク構成を構築する。最適化問題（巡回セールスマン問題など）などに対する正常な動作を確認する。また、強誘電体キャパシタのモデルを局所学習則とともに組み込んだ論理シミュレーションを行う。中規模・より大規模のニューロモーフィックシステムを想定し、ディープニューラルネット・畳み込みニューラルネット・リザーバニューラルネットなどのネットワーク構成を構築する。連想記憶・画像認識・最適化問題などに対する正常な動作を確認する。さらに、回路シミュレーションで、動的挙動も含むニューロモーフィックシステムの正確な動作を解析する。

つぎに、実機では、BLTで、シナプス素子だけ個別基板に集積化したクロスポイントチップや、ニューロン素子をLSIに集積化しそのうえにシナプス素子を成膜したLSI積層チップなどを用いて、実機を試作して動作を確認する。

最後に、大規模化では、大規模の1兆素子程度のニューロモーフィックシステムを想定し、超コンパクト・超低パワーの人工知能の実現にむけての可能性も検討する。ここでは、まずは上記の連想記憶・画像認識・最適化問題などを同じシステム構成のニューロモーフィックシステムで実現できるかを確認することで、汎用人工知能としての動作を評価する。

## 9. 次年度使用が生じた理由と使用計画

主に、予定していた旅費の一部が、若干安価になったため、残額として次年度使用額が生じた。次年度は、汎用人工知能の評価にむけた、物品費として使用する計画である。

## 10. 研究発表（令和元年度の研究成果）

[雑誌論文] 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Ikeda Hiroya, Yamane Hiroki, Takishita Yuta, Kimura Mutsumi, Nakashima Yasuhiko  | 4. 卷<br>11              |
| 2. 論文標題<br>Influence of characteristic variation of oxide semiconductor and comparison of the activation function in neuromorphic hardware | 5. 発行年<br>2020年         |
| 3. 雑誌名<br>Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE   | 6. 最初と最後の頁<br>232 ~ 252 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1587/nolta.11.232  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-               |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Takishita Yuta, Kobayashi Masaki, Hattori Kazuki, Matsuda Tokiyoshi, Sugisaki Sumio, Nakashima Yasuhiko, Kimura Mutsumi | 4. 卷<br>10                    |
| 2. 論文標題<br>Memristor property of an amorphous Sn?Ga?O thin-film device deposited using mist chemical-vapor-deposition method      | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>AIP Advances  | 6. 最初と最後の頁<br>035112 ~ 035112 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1063/1.5143294  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）   | 国際共著<br>-                     |

|  |                        |
|--|------------------------|
| 1.著者名<br>松田 時宜、梅田 鉄馬、加藤 雄太、西本 大貴、杉崎 澄生、古田 守、木村 瞳 | 4.巻<br>J102-C          |
| 2.論文標題<br>レアメタルフリー Ga-Sn-O 材料の薄膜トランジスタへの応用       | 5.発行年<br>2019年         |
| 3.雑誌名<br>電子情報通信学会論文誌 C                           | 6.最初と最後の頁<br>305 ~ 311 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし                   | 査読の有無<br>有             |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難           | 国際共著<br>-              |

|   |                          |
|---|--------------------------|
| 1.著者名<br>Kurasaki、Tanaka、Sugisaki、Matsuda、Koretomo、Magari、Furuta、Kimura   | 4.巻<br>12                |
| 2.論文標題<br>Memristive Characteristic of an Amorphous Ga-Sn-O Thin-Film Device with Double Layers of Different Oxygen Density | 5.発行年<br>2019年           |
| 3.雑誌名<br>Materials  | 6.最初と最後の頁<br>3236 ~ 3236 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3390/ma12193236  | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                |

|   |                              |
|---|------------------------------|
| 1.著者名<br>Kimura Mutsumi   | 4.巻<br>58                    |
| 2.論文標題<br>Emerging applications using metal-oxide semiconductor thin-film devices | 5.発行年<br>2019年               |
| 3.雑誌名<br>Japanese Journal of Applied Physics                                      | 6.最初と最後の頁<br>090503 ~ 090503 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.7567/1347-4065/ab1868                              | 査読の有無<br>有                   |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）   | 国際共著<br>-                    |

|  |                        |
|--|------------------------|
| 1.著者名<br>Mutsumi Kimura、Kenta Umeda、Keisuke Ikushima、Toshimasa Hori、Ryo Tanaka、Junpei Shimura、Atsushi Kondo、Takumi Tsuno、Sumio Sugisaki、Ayata Kurasaki、Kaito Hashimoto、Tokiyoshi Matsuda、Tokiyoshi Kameda、and Yasuhiko Nakashima | 4.巻<br>90              |
| 2.論文標題<br>Neuromorphic System with Crosspoint-type Amorphous Ga-Sn-O Thin-Film Devices as Self-Plastic Synapse Elements  | 5.発行年<br>2019年         |
| 3.雑誌名<br>ECS Trans.  | 6.最初と最後の頁<br>157 ~ 166 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>有             |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-              |

〔学会発表〕 計26件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 16件)

## 1. 発表者名

Mutsumi Kimura

## 2. 発表標題

Neuromorphic System using Thin-Film Devices as a Novel Computing System

## 3. 学会等名

ISACIT 2019 (招待講演) (国際学会)

## 4. 発表年

2019年

## 1. 発表者名

木村 瞳

## 2. 発表標題

薄膜デバイスを用いたニューロモーフィックシステム - 有機デバイスの可能性 -

## 3. 学会等名

高分子学会 有機エレクトロニクス研究会 (招待講演)

## 4. 発表年

2020年

## 1. 発表者名

木村 瞳

## 2. 発表標題

薄膜デバイスを用いたリアルニューロモーフィックシステム

## 3. 学会等名

エレクトロニクス実装学会 第34回春季講演大会 特別シンポジウム 「IoTによるフィジカル空間変革とAI社会実装」 (招待講演)

## 4. 発表年

2020年

## 1. 発表者名

木村 瞳

## 2. 発表標題

薄膜デバイスを用いたニューロモーフィックシステム

## 3. 学会等名

薄膜材料デバイス研究会 高知特別研究会 (招待講演)

## 4. 発表年

2020年

1. 発表者名  
Mutsumi Kimura

2. 発表標題  
Brain-like Integrated System using Thin-Film Devices

3. 学会等名  
The 8th RIEC International Symposium on Brain Functions and Brain Computer (招待講演) (国際学会)

4. 発表年  
2020年

1. 発表者名  
Mutsumi Kimura

2. 発表標題  
Neuromorphic Chip using AOS Thin-Film Devices

3. 学会等名  
The 77th Fujihara Seminar (招待講演) (国際学会)

4. 発表年  
2019年

1. 発表者名  
Mutsumi Kimura

2. 発表標題  
Novel application using TFTs

3. 学会等名  
IMID 2019 (招待講演) (国際学会)

4. 発表年  
2019年

1. 発表者名  
Mutsumi Kimura

2. 発表標題  
Neuromorphic System using Thin-Film Devices

3. 学会等名  
2019 ULSIC vs. TFT Conference (招待講演) (国際学会)

4. 発表年  
2019年

## 1. 発表者名

Mutsumi Kimura, Kenta Umeda, Keisuke Ikushima, Toshimasa Hori, Ryo Tanaka, Tokiyoshi Matsuda, Tomoya Kameda, and Yasuhiko Nakashima

## 2. 発表標題

Neuro-inspired System with Crossbar Array of Amorphous Metal-Oxide-Semiconductor Thin-Film Devices as Self-Plastic Synapse Units - Letter Recognition of Five Alphabets -

## 3. 学会等名

The 26th International Conference on Neural Information Processing, ICONIP 2019 (国際学会)

## 4. 発表年

2019年

## 1. 発表者名

Kaito Hashimoto, Ayata Kurasaki, Mutsumi Kimura, and Tokiyoshi Matsuda

## 2. 発表標題

In-Ga-Zn-O Film Thickness Dependence of Memristor Characteristic for Resistive Random Access Memory

## 3. 学会等名

IMFEDK 2019 (国際学会)

## 4. 発表年

2019年

## 1. 発表者名

Yuki Shibayama, Daiki Yamakawa, Yuki Onishi, and Mutsumi Kimura

## 2. 発表標題

Ga-Sn-O Thin Film Synapse for Neural Network

## 3. 学会等名

IMFEDK 2019 (国際学会)

## 4. 発表年

2019年

## 1. 発表者名

Takumi Tsuno, Jumpei Shimura, Atsushi Kondo, and Mutsumi Kimura

## 2. 発表標題

Synapse Elements in Neural Network Based on Multilayer Cross-Point Device using IGZO

## 3. 学会等名

IMFEDK 2019 (国際学会)

## 4. 発表年

2019年

1. 発表者名

Homare Yoshida, Yuta Miyabe, and Mutsumi Kimura

2. 発表標題

Crystal Growth of (Bi, La)4Ti3012 Using a Two Step Deposition Process

3. 学会等名

IMFEDK 2019 (国際学会)

4. 発表年

2019年

1. 発表者名

柴山 友輝, 山川 大樹, 大西 祐輝, 山根 弘樹, 中島 康彦, 木村 瞳

2. 発表標題

ニューラルネットワーク用Ga-Sn-O薄膜シナプス

3. 学会等名

薄膜材料デバイス研究会 第16回研究集会

4. 発表年

2019年

1. 発表者名

山川 大樹, 柴山 友輝, 大西 祐輝, 池田 裕哉, 中島 康彦, 木村 瞳

2. 発表標題

アモルファスIn-Ga-Zn-O薄膜シナプスの可塑性

3. 学会等名

薄膜材料デバイス研究会 第16回研究集会

4. 発表年

2019年

1. 発表者名

Mutsumi Kimura, Keisuke Ikushima, Daiki Yamakawa, Hiroki Yamane, and Yasuhiko Nakashima

2. 発表標題

Real Neuromorphic System using LSI Chip and Thin-Film Devices

3. 学会等名

ICONS 2019 (国際学会)

4. 発表年

2019年

## 1. 発表者名

Ayata Kurasaki, Sumio Sugisaki, Ryo Tanaka, Tokiyoshi Matsuda, and Mutsumi Kimura

## 2. 発表標題

Development of Two-Layered ReRAM using Ga-Sn-O Thin Film

## 3. 学会等名

AM-FPD '19 (国際学会)

## 4. 発表年

2019年

## 1. 発表者名

Daiki Yamakawa, Yuki Shibayama, Hiroki Yamane, Yasuhiko Nakashima, and Mutsumi Kimura

## 2. 発表標題

Evaluation of IGZO Synapses for Neuromorphic Systems

## 3. 学会等名

AM-FPD '19 (国際学会)

## 4. 発表年

2019年

## 1. 発表者名

Yan Chen, Jing Zhang, Yingjie Zhang, Renyuan Zhang, Mutsumi Kimura, and Yasuhiko Nakashima

## 2. 発表標題

A Programmable Calculation Unit Employing Memcapacitor-based Neuromorphic Circuit

## 3. 学会等名

NEWCAS 2019 (国際学会)

## 4. 発表年

2019年

## 1. 発表者名

Hiroya Ikeda, Hiroki Yamane, Yuki Shibayama, Mutsumi Kimura, and Yasuhiko Nakashima

## 2. 発表標題

Evaluation of Neuromorphic Hardware using Cellular Neural Networks and Oxide Semiconductors

## 3. 学会等名

APDCM 2019 (国際学会)

## 4. 発表年

2019年

1. 発表者名

橋本 快人, 倉崎 彩太, 田中 遼, 杉崎 澄生, 角田 涼, 木村 瞳

2. 発表標題

Ga-Sn-O薄膜を用いた抵抗変化型メモリのメモリスタ特性の電極依存性

3. 学会等名

映像情報メディア学会

4. 発表年

2019年

1. 発表者名

吉田 誉, 石崎 勇真, 宮部 雄太, 木村 瞳

2. 発表標題

2段階堆積プロセスを用いた(Bi,La)4Ti3O12薄膜の結晶成長

3. 学会等名

映像情報メディア学会

4. 発表年

2019年

1. 発表者名

津野 拓海, 近藤 厚志, 新村 純平, 田中 遼, 山川 大樹, 柴山 友輝, 岩城 江津子, 木村 瞳

2. 発表標題

ニューラルネットワークのための多層クロスポイント型シナプス素子

3. 学会等名

映像情報メディア学会

4. 発表年

2019年

1. 発表者名

小林 雅樹, 杉崎 澄生, 木村 瞳

2. 発表標題

ミストCVD法によるGa-Sn-O薄膜を用いたメモリスタ開発

3. 学会等名

映像情報メディア学会

4. 発表年

2019年

## 1. 発表者名

Mutsumi Kimura, Keisuke Ikushima, Daiki Yamakawa, Hiroki Yamane, and Yasuhiko Nakashima

## 2. 発表標題

Neuromorphic System using an LSI Chip and a-IGZO Thin-Film Devices

## 3. 学会等名

38th Electronic Materials Symposium (国際学会)

## 4. 発表年

2019年

## 1. 発表者名

木村 瞳, 田中 遼, 山川 大樹, 柴山 友輝, 池田 裕哉, 滝下 雄太, 中島 康彦

## 2. 発表標題

局所学習則と薄膜デバイスを用いるリアルニューロモーフィックシステム - 文字学習の動作確認 -

## 3. 学会等名

第80回応用物理学会秋季学術講演会

## 4. 発表年

2019年

〔図書〕 計0件

1 1. 研究成果による産業財産権の出願・取得状況

計0件（うち出願0件 / うち取得0件）

1 2. 科研費を使用して開催した国際研究集会

計0件

1 3. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

-

1 4. 備考

-