

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 9 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02194

研究課題名(和文)大規模神経構造可視化を実現するコンピューショナル・ストレージ技術の研究開発

研究課題名(英文) Research and Development of Computational Storage Technology to Realize Large Scale Neuron Structure Visualization

研究代表者

田中 陽一郎 (Tanaka, Yoichiro)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：60801123

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：神経構造3次元可視化解析を可能とする分散KVS型オブジェクトストレージを実装したコンピューショナル・ストレージ解析システムを開発した。システム内データ配置を最適化し神経構造可視化ツールで性能向上を検証、HDDクラスタ並列転送エッジキャッシュによりデータアクセス性能の大幅向上を達成した。人工培養神経回路の刺激応答特性解析、リザーバーコンピューティング特性の解析、炎症性サイトカインによる活動変調効果の解析に成功した。マイクロ波アシスト型及び熱アシスト型の垂直磁気記録において、上下2層の記録層を用いた多重分離記録のメカニズムを明確に示し、それぞれ記録密度を現行技術の2倍に高めることを検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脳神経科学領域で必要とされるPB級大規模データによる3次元可視化解析に対し、データ移動を最小にして解析を可能とするエッジ配置型分散オブジェクト・コンピューショナル・ストレージの基礎構成を試作し、基本性能を検証することができた。大規模データの解析効率を高め、ビッグデータ創出源におけるリアルタイム解析をも可能とする道筋を明確に示すことができたと考える。従来の垂直磁気記録方式によるHDDの記録容量を2倍に高める多重記録方式の有効性を検証することができ、本コンピューショナル・ストレージの大容量記憶性能を飛躍させる原動力になることが示された。

研究成果の概要(英文)：We have developed a computational-storage analytics system with KVS Distributed Object storage embedded. Optimizing data allocation in the system enabled performance improvement and HDD cluster parallel-transfer edge cache largely enhanced data access speed. We were successfully achieved analytics of stimulation response analytics for reconstructed neural networks, reservoir computing characterization, and enhanced responses to inflammatory cytokine. We have confirmed that the recording densities of both microwave-assisted perpendicular magnetic recording and heat-assisted recording doubled over conventional recording scheme by completing demultiplex recording methods for each recording technology.

研究分野：電子デバイスおよび電子機器関連

キーワード：コンピューショナル・ストレージ 神経構造 可視化

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) シナプスから全脳まで「超マルチスケール観察の PB 級巨大データ解析」への対応

脳神経構造・ダイナミック伝達機能解析では、膨大なデータ・インテンシブ解析が進められている。ゲノム染色手法と高分解能顕微鏡を用いた脳神経構造及び接続機能解析では、マウス脳海馬(0.25 立方 mm 試料)の高解像 3 次元解析画像が 60TB 程度になる。更にシナプスの観察が可能な高分解能顕微鏡データではマウス全脳神経構造データが約 1PB にもなる。Ca イメージングによる神経伝達機能解析では 1 時間あたり 4.5PB ものデータが生成される。fMRI 等に比べ数桁以上の圧倒的な高解像度、高い時間分解能の神経構造・ダイナミック伝達機能観察を実現するために、PB 級の極めて大規模なデータ解析力がエッジで必須となる。

(2) エッジにおける「大容量ストレージと解析力の一体化」でデータ移動損失を最小化

脳神経系解析の PB 級大規模生成データを一次ストレージで受けネットワーク経由で分離サーバーに転送・解析する従来手法では、転送時間とアクセス遅延が本質的律速となり迅速な解析が不可能である。巨大データを創出源近傍で受ける大規模ストレージと解析の一体化が重要であるが、ストレージと解析プロセッサの階層間レーテンシーも大きな問題である。プロセッサと Last Level Cache (LLC) がサブナノ秒からナノ秒の短レーテンシー動作をするが、大容量データ保管の中核であるハードディスク装置 (HDD) は 6 桁も遅いミリ秒以上の長レーテンシーで動作する。データの在処であるストレージと解析プロセッサ間のレーテンシー格差を埋める統合的データ処理アーキテクチャを構築することが、大規模データ解析処理における危急の課題である。データ創出源で大容量データのリアルタイム解析処理を可能とする革新的なコンピューショナル・ストレージが必要とされている。

2. 研究の目的

全脳規模の神経構造・ダイナミック伝達機能の 3 次元可視化解析を可能とするため、分散ストレージ及びコンピューティング機能を統合することにより多様な非構造化データのリアルタイム処理に対応する Key-Value Store (KVS) 型の全く新しい分散オブジェクト・コンピューショナル・ストレージ概念による解析プラットフォームを構築することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 強力なコンピューティング機能を持つコンピューショナル・ストレージのモジュール最適構成の明確化

大規模解析プラットフォームの要素システムとなるコンピューショナル・ストレージのモジュールの最適な構成を明確化して開発する。基本的機構設計として、複数の GPU/CPU プロセッサ群と LLC 直下にメインメモリ DRAM、不揮発性メモリ、SSD からなる KVS 階層メモリスタックを配置し、Key 探索や記録キャッシュとして機能させる不揮発性メモリ、メタデータ記録や Key - データ保管物理アドレス変換を担う NVMe 型高速フラッシュメモリ SSD、更に HDD の Value まで階層メモリから KVS によるデータアクセス管理を行う。動作機能としては、Key-Value データの記録においては、不揮発性メモリが一時キャッシュとしてデータを受領したのち、HDD に実装されたシーケンシャル化キャッシュに送られ、高速にディスク上に記録される。データ検索にあたっては、不揮発性メモリに保管された Key を高速にサーチし、その結果をもって SSD 内の Key-LBA (HDD 上のデータ保管論理アドレス) 変換テーブルを参照してデータコンテンツ (Value) にアクセスする。また、SSD 内に保管された該当するメタデータ検索によりデータコンテンツ (Value) の分類・検索も可能となる。データ再生時は、HDD からリードキャッシュの SSD を経て再生される構成である。

(2) ストレージデバイスの多重記録及び高速アクセス化の研究開発

コンピューショナル・ストレージの記録コアとなる大容量ストレージ装置 (マルチ HDD) への記録性能を高める開発を行う。15TB の容量を持つニアライン型 HDD に記録データのシーケンシャル化キャッシュ手法を適用し、ドライブ単体で記録データレートを約 20 倍の 1200 IOPS に向き上させる。メディア上にシーケンシャル化キャッシュを設けた初期実験では、60 IOPS から 900 IOPS まで 15 倍の高速化が図られた。実験ではキャッシュ飽和に伴う性能低下が見られたが、本研究では不揮発性メモリを使ったシーケンシャル化キャッシュを適用し適時データ Evict 処理を施すことで、1200 IOPS 達成を目標とする。

また、次世代 HDD 記録方式として、異なる強磁性共鳴周波数を持つ 2 つの記録層に対してヘッド記録素子スピントルク発振 (STO) 周波数による多重記録を可能とする技術の研究開発を行う。これまでシミュレーションにより原理的可能性を明確にしておき、本研究により実用解としての最適構成を明らかにする。多重化方式により、HDD 記録密度を現行技術 (記録層 1 層) に対し、

2 倍に高めることを目標とする。

(3) コンピュータショナル・ストレージのモジュールクラスタによる神経構造・ダイナミック伝達機能の3次元可視化解析プラットフォームの開発

コンピュータショナル・ストレージのモジュール(コンセプト検証版)をクラスタ構成に接続したエッジ型コンピュータショナル・ストレージデータ解析プラットフォームを開発し、Ceph等のスケラブルな分散ファイルシステム上で稼働させることを目指す。プラットフォーム全体でのデータストア容量は2.88PB、ランダム記録性能は5,000,000 IOPS以上となる計画で、各モジュールに配置されたGPUクラスタによって3次元可視化のデータ分散解析処理が行われる。

4. 研究成果

(1) コンピュータショナル・ストレージのモジュール最適構成の研究

コンピュータショナル・ストレージ解析テストベッドの開発

1PB級の容量のHDD/SSDハイブリッドストレージ機能に、4-GPU/14-Xeon CPU(合計226コア)及び688GBメモリによるコンピューティング機能を近接配置した検証試験では、SSD4台で2,700,000IOPSの高速ランダムアクセス性能と約11GB/sのシーケンシャル記録再生性能を確認した。垂直HDDクラスタのstriping手法によりHDD20台でランダムアクセス20,000IOPSと5GB/s性能を確認した。またHDDクラスタ150台規模でランダムアクセス150,000IOPS級を達成できることを明らかにし、NVMe-SSDをHDD及びメモリと階層的に配置したシステムと、そのデータ配置を制御するKVSを適用することによる性能向上の指針が得られた。SSD群とコンピューティング機能間を100Gbps Ethernetを介してRDMA接続し、脳神経構造データへの高速アクセスを可能な構成を構築した。

全脳規模神経構造の3次元可視化解析を可能とするため6基のコンピュータノードと12基のストレージノードを一体化した強力なコンピュータショナル・ストレージ解析テストベッド(モジュール)を完成させた。大容量垂直HDDクラスタ(合計2.004TB)と高速SSDクラスタ(合計227TB)による総容量2.23PBストレージに6-GPUs/25-CPU(合計336コア)及びメモリ領域1408GBの強力なコンピューティング機能を実装した。

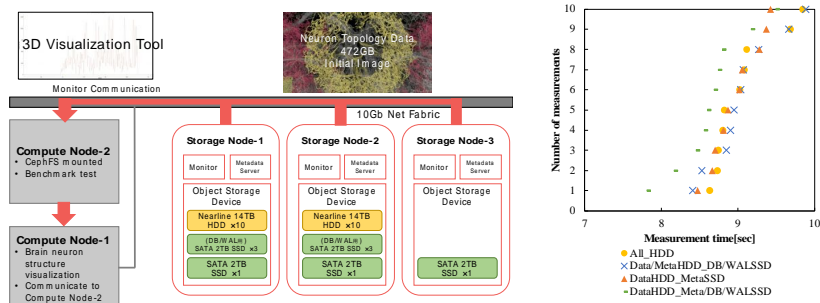


図1 コンピュータショナル・ストレージモジュールにおけるデータ配置による脳神経データアクセス性能の向上

Ceph分散オブジェクトストレージを実装した解析システムの性能開発

この解析プラットフォームに、KVS型分散オブジェクトストレージ機能のCephシステムを実装した。Ceph構成の基本性能に関するPlacement Group数やOSD数などの構成条件依存性を検証したのち、脳神経構造3次元可視化ツールを適用した性能検証を実施した。同数のHDD構成RAIDOに比べ、Ceph分散オブジェクトストレージシステムのアクセス性能が優れることと性能上の特徴を明らかにした。

解析性能の最大化を目的にCephシステム内におけるデータ配置を最適化し、脳神経構造3次元可視化ツールと分担研究者が開発したラット大脳皮質神経画像システムを用いて性能向上を検証した。大規模データ処理に対し、メタデータ及びバックエンドデータをSSDに収納すること、HDDクラスタ並列転送のメリットを活かしたエッジキャッシュを適用することにより、データアクセス性能を大幅に高めることが検証された。

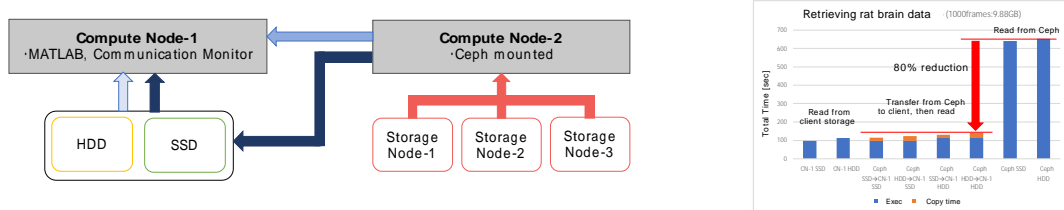


図2 コンピュータショナル・ストレージモジュール内のデータパス最適化による脳神経データアクセス時間短縮効果

(2) ストレージデバイスの多重記録及び高速アクセス化の研究開発

マイクロ波アシスト垂直磁気記録による多重記録技術の研究

次世代 HDD 記録方式であるマイクロ波アシスト垂直磁気記録をベースに、強磁性共鳴周波数の異なる上下 2 層の記録層構成を用いた多重記録によって記録密度を倍増させる可能性をシミュレーション解析により明らかにした。各記録層における磁化反転メカニズムを仔細に分析した結果、多重記録を担う上下 2 層の記録層それぞれの強磁性共鳴周波数設定の最適条件と、それぞれの記録層への誤り記録を最小化するために、マイクロ波周波数の波長よりも短い反転時間で高速反転記録を行うように記録層の磁気異方性エネルギーを高く設定することが重要であることを解明した。これにより多重記録を実現する上で重要となる高速反転メカニズムを明らかにし、記録密度を約 2 倍に高めることが可能であることを示した。

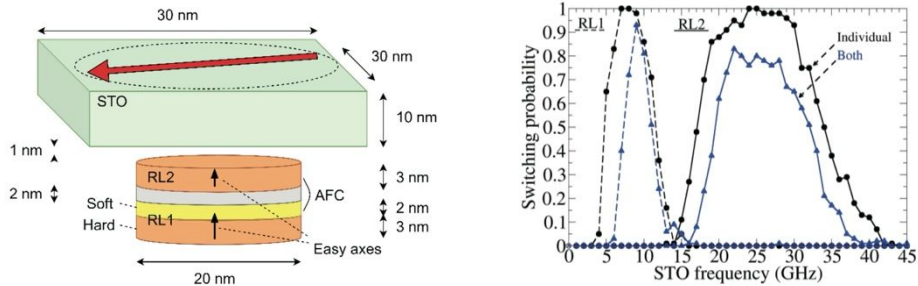


図3 マイクロ波アシスト垂直磁気記録による多重記録機構と分離記録性能の検証

熱アシスト垂直磁気記録による多重記録技術の研究

もう一つの次世代 HDD 記録方式である熱アシスト型垂直磁気記録方式による多重化の可能性についてシミュレーションで検証した。上下二層構造の記録各層のキュリー温度を変え、微小レーザー加熱による昇温を制御することにより、各層への多重記録が可能であることを明らかにし、記録密度を現行技術（記録層 1 層）の 2 倍に高めることを検証した。書き換えする記録層のキュリー温度の高低により記録モードを切り替える必要があり、瓦記録のような read-modify-write 機能が必要であることも明らかにした。

スピントルク発振素子 (STO) の発振周波数同期現象を用いたニューロモルフィック記録構造の研究

より高速で低消費電力のシステムを目指し、スピントルク発振素子 (STO) の磁気的なカップリングによる発振周波数の同期現象を用いたニューロモルフィック記録構造の検討を新たに本格化した。STO 列の 2 次元配置による素子列データ伝送が可能であること、STO 素子形状の制御により選択的なデータ伝送が出来ることをマイクロマグネティクスシミュレーションで検証し、高速不揮発性磁性ストレージの可能性が高いことを確認した。

(3) 神経構造・ダイナミック伝達機能の 3 次元可視化解析プラットフォームの開発

3 次元蛍光顕微鏡による *Drosophila* と *Mouse* の脳神経構造データを取得し、3 次元可視化解析ツールを使った大規模神経構造可視化解析性能の評価を行った。3 次元蛍光顕微鏡および Ca イメージングによるダイナミック神経伝達機能の観測手段から創出されるデータを画像化前処理につなげるデータアキュイジションシステムを構築した。上記解析テストベッドを専用の高速光ネットワークで一体化し高速なデータ転送とコンピューテーションを可能とした。

これにより人工的に培養した神経回路の活動に関して、培養神経回路の刺激応答特性の解析、リザーブコンピューティング特性の解析、炎症性サイトカインによる活動変調効果の解析に成功し、原著論文などとして発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計26件（うち査読付論文 26件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 24件）

1. 著者名 Ise Tsubasa, Greaves Simon John, Tanaka Yoichiro	4. 巻 59
2. 論文標題 Controlling Information Flow in Arrays of Spin-Torque Oscillators	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/tmag.2023.3294515	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Tanaka Yoichiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Magnetic data storage technology: from perpendicular magnetic recording to the computational-storage integration	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Spintronics XVI	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2673322	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Isurugi Daiki, Saito Takashi, Tham Kim Kong, Ogawa Tomoyuki, Tanaka Yoichiro, Greaves Simon John, Saito Shin	4. 巻 59
2. 論文標題 Blocking Phenomenon of Hard/Soft Bilayer L10-FePt Grains in Granular Film	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2023.3296155	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Itagaki Ryo, Kanai Yasushi, Greaves Simon	4. 巻 71
2. 論文標題 Micromagnetic model analysis of dual field generation layer (FGL) spin torque oscillators (STO) for microwave-assisted magnetic recording (MAMR)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 S191 ~ S201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3233/JAE-220146	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Greaves Simon	4. 巻 588
2. 論文標題 Three-dimensional magnetic recording	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 171343 ~ 171343
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2023.171343	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Greaves Simon John, Tatsuno Keita, Kanai Yasushi	4. 巻 -
2. 論文標題 Write Head Design for Control of Transition Curvature in Heat-Assisted Magnetic Recording	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2023.3319459	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Pires Jorge, Sayyafan Amirhossein, Belzer Benjamin J., Sivakumar Krishnamoorthy, Greaves Simon	4. 巻 -
2. 論文標題 Architecture Optimization of a CNN Media Noise Estimator for TDMR	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2023.3325899	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 Tozman P., Isogami S., Suzuki I., Bolyachkin A., Sepehri-Amin H., Greaves S.J., Suto H., Sasaki Y., Chang T.Y., Kubota Y., Steiner P., Huang P.-W., Hono K., Takahashi Y.K.	4. 巻 -
2. 論文標題 Dual-layer FePt-C granular media for multi-level heat-assisted magnetic recording	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 119869 ~ 119869
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2024.119869	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 Sumi Takuma, Yamamoto Hideaki, Katori Yuichi, Ito Koki, Moriya Satoshi, Konno Tomohiro, Sato Shigeo, Hirano-Iwata Ayumi	4. 巻 120
2. 論文標題 Biological neurons act as generalization filters in reservoir computing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2217008120	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 山本 英明、平野 愛弓、佐藤 茂雄	4. 巻 92
2. 論文標題 マイクロ流体デバイスを用いた神経回路機能の実細胞再構成	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 278 ~ 282
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/oubutsu.92.5_278	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Yamamoto Hideaki, Spitzner F. Paul, Takemuro Taiki, Buendia Victor, Murota Hakuba, Morante Carla, Konno Tomohiro, Sato Shigeo, Hirano-Iwata Ayumi, Levina Anna, Priesemann Viola, Munoz Miguel A., Zierenberg Johannes, Soriano Jordi	4. 巻 9
2. 論文標題 Modular architecture facilitates noise-driven control of synchrony in neuronal networks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.ade1755	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 Sakaibara Mamoru, Yamamoto Hideaki, Murota Hakuba, Monma Nobuaki, Sato Shigeo, Hirano-Iwata Ayumi	4. 巻 695
2. 論文標題 Enhanced responses to inflammatory cytokine interleukin-6 in micropatterned networks of cultured cortical neurons	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Biochemical and Biophysical Research Communications	6. 最初と最後の頁 149379 ~ 149379
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bbrc.2023.149379	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 H. Yamamoto, A. Hirano-Iwata, S. Sato	4. 巻 2023
2. 論文標題 Microfluidic technologies for reconstituting neuronal network functions in vitro	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JSAP Review	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/jsaprev.230420	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Simon John Greaves, Yasushi Kanai	4. 巻 59
2. 論文標題 Hysteresis Loops of Recording Media Grains Under the Influence of High-Frequency Fields	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS	6. 最初と最後の頁 3200607-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2022.3220717	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 A. Sayyafan, A. Aboutaleb, B. Belzer, K. Sivakumar, S. Greaves and K. S. Chan	4. 巻 58
2. 論文標題 Turbo-detection for multilayer magnetic recording using deep neural network-based equalizer and media noise predictor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS	6. 最初と最後の頁 3200611-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2021.3122136	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 H. Yamane, S. J. Greaves and Y. Tanaka,	4. 巻 58
2. 論文標題 Optimising the thickness and diameter of dual structure patterned media dots for heat assisted magnetic recording	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS	6. 最初と最後の頁 3200705-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2022.3144982	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 S. J. Greaves and Y. Sonobe	4. 巻 13
2. 論文標題 Writing domains in nanowires using a spin torque oscillator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 025214-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/9.0000459	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 A. Sayyafan, A. Aboutaleb, B. J. Belzer, K. Sivakumar, S. Greaves, K. S. Chan and A. James	4. 巻 59
2. 論文標題 Convolutional neural network-based media noise prediction and equalization for TDMR turbo-detection with write/read TMR	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS	6. 最初と最後の頁 3001011-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2022.3216640	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 S. J. Greaves, R. Itagaki and Y. Kanai	4. 巻 58
2. 論文標題 Optimisation of soft layer uniaxial anisotropy gradient in media for microwave assisted magnetic recording	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS	6. 最初と最後の頁 3101309-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2021.3128644	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Yuya Sato, Hideaki Yamamoto, Hideyuki Kato, Takashi Tanii, Shigeo Sato, Ayumi Hirano-Iwata	4. 巻 16
2. 論文標題 Microfluidic cell engineering on high-density microelectrode arrays for assessing structure-function relationships in living neuronal networks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Front neuroscience	6. 最初と最後の頁 943310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fnins.2022.943310	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Yamane Hikaru, Greaves Simon John, Tanaka Yoichiro	4. 巻 57
2. 論文標題 Heat-Assisted Magnetic Recording on Dual Structure Bit Patterned Media	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/tmag.2020.3020088	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Aboutaleb Ahmed, Sayyafan Amirhossein, Sivakumar Krishnamoorthy, Belzer Benjamin, Greaves Simon, Chan Kheong Sann, Wood Roger	4. 巻 57
2. 論文標題 Deep Neural Network-Based Detection and Partial Response Equalization for Multilayer Magnetic Recording	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2020.3038435	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 Greaves Simon John, Itagaki Ryo, Kanai Yasushi	4. 巻 57
2. 論文標題 Effect of FGL Cone Angle on Recording Performance in Microwave-Assisted Magnetic Recording	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2020.3036382	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 斎藤若, Simon Greaves, 田中陽一郎	4. 巻 4
2. 論文標題 スピントルク発振素子のみを用いた二層選択記録の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本磁気学会論文特集号	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20819/msj.tmsj.20TR406	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Taiki Takemuro, Hideaki Yamamoto, Shigeo Sato, Ayumi Hirano-Iwata	4. 巻 59
2. 論文標題 Polydimethylsiloxane microfluidic films for in vitro engineering of small-scale neuronal networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 117001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abc1ac	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 住拓磨, 山本英明, 平野愛弓	4. 巻 63
2. 論文標題 超軟ゲル表面を用いた神経細胞の生体模倣培養技術の開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 表面と真空	6. 最初と最後の頁 298-303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.63.298	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

〔学会発表〕 計65件 (うち招待講演 20件 / うち国際学会 32件)

1. 発表者名 YOICHIRO TANAKA
2. 発表標題 Magnetic data storage technology; from the invention of perpendicular magnetic recording (PMR) to the social integration
3. 学会等名 Institute of Physics Magnetism 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 YOICHIRO TANAKA
2. 発表標題 Magnetic data storage technology; from the invention of perpendicular magnetic recording (PMR) to the social integration
3. 学会等名 XII-Latin American Workshop on Magnetism, Magnetic Materials (LAW3M 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 YOICHIRO TANAKA
2. 発表標題 Magnetic data storage technology; from the invention of perpendicular magnetic recording (PMR) to the social integration
3. 学会等名 SPIN ASIA 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 YOICHIRO TANAKA
2. 発表標題 Magnetic data storage technology; from the invention of perpendicular magnetic recording (PMR) to the social integration
3. 学会等名 The 13th Annual Symposium on Magnetism 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 D. Isurugi, T. Saito, K. K. Tham, T. Ogawa, Y. Tanaka, S. Greaves and S. Saito
2. 発表標題 Blocking phenomenon of hard/soft bilayer FePt grains in granular film
3. 学会等名 Intermag 2023, Sendai (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Ise, S. Greaves and Y. Tanaka
2. 発表標題 Control of information flow in arrays of spin-torque oscillators
3. 学会等名 Intermag 2023, Sendai (国際学会)
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 S. J. Greaves and Y. Kanai
2 . 発表標題 Three dimensional heat assisted magnetic recording
3 . 学会等名 IEICE MRIS meeting
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 S. J. Greaves, K. Tatsuno and Y. Kanai
2 . 発表標題 Write head design for control of transition curvature in heat-assisted magnetic recording
3 . 学会等名 TMRC 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 J. Pires, A. Sayyafan. B. Belzer, K. Sivakumar and S. Greaves
2 . 発表標題 Architecture optimization of a CNN media noise estimator for TDMR
3 . 学会等名 TMRC 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 S. J. Greaves and Y. Kanai
2 . 発表標題 Three dimensional magnetic recording
3 . 学会等名 TMRC 2023 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Ise, S. J. Greaves and Y. Tanaka
2. 発表標題 Spiking neuron model using spin torque oscillators
3. 学会等名 MSJ annual conference
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Yamamoto, A. Hirano-Iwata, S. Sato
2. 発表標題 vitro neuroengineering technologies for reconstituting and decoding neuronal network dynamics
3. 学会等名 Tohoku NeuroTech Symposium (TNS) 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Sumi, H. Yamamoto, Y. Katori, K. Ito, S. Sato, A. Hirano-Iwata
2. 発表標題 Physical reservoir computing using dynamics of biological neuronal network with modular structure
3. 学会等名 10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 住 拓磨, 山本英明, 伊藤巨輝, 香取勇一, 佐藤茂雄, 平野愛弓
2. 発表標題 マイクロパターン培養神経ネットワークのダイナミクスを用いたリザーバコンピューティング
3. 学会等名 第33回日本神経回路学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 室田白馬, 山本英明, 竹室汰貴, 佐藤茂雄, J. Soriano, 平野愛弓
2. 発表標題 人工神経細胞回路における摂動応答特性のモジュール構造依存性の解析
3. 学会等名 第33回日本神経回路学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 門間信明, 山本英明, 室田白馬, 守谷 哲, 藤原直哉, 平野愛弓, 佐藤茂雄
2. 発表標題 結合指向性を有する神経細胞ネットワークの in vitro-in silico モデリング
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤亘輝, 山本英明, 住 拓磨, 香取勇一, 佐藤茂雄, 平野愛弓
2. 発表標題 大規模モジュール構造型培養神経回路のリザーブ特性の解析
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 室田白馬, 山本英明, 門間信明, 佐藤茂雄, 平野愛弓
2. 発表標題 人工神経細胞回路における光刺激前後での神経アンサンブルの解析
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 園 勇輝, 山本英明, 佐藤有弥, 香取勇一, 平野愛弓, 佐藤茂雄
2. 発表標題 高密度多点電極アレイ上にパターンニングしたモジュール構造型大規模培養神経回路の活動解析
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Yamamoto, T. Sumi, Y. Sato, S. Sato, A. Hirano-Iwata
2. 発表標題 Bottom-Up Investigation of Multicellular Computing Within Biological Neuronal Networks
3. 学会等名 2023 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Sumi, H. Yamamoto, Y. Katori, K. Ito, S. Sato, A. Hirano-Iwata
2. 発表標題 Modular Topology Enhances Reservoir Computing Performance in Biological Neuronal Networks
3. 学会等名 2023 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本英明, 住 拓磨, 平野愛弓, 佐藤茂雄
2. 発表標題 人工神経細胞回路を用いた物理リザーバーコンピューティング
3. 学会等名 化学とマイクロ・ナノシステム学会第48回研究会 (CHEMINAS48) (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本英明
2. 発表標題 生体工学と機械学習による神経回路機能の探求
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2023 (SSI2023) (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Yamamoto, S. Sato, A. Hirano-Iwata
2. 発表標題 Optogenetic perturbation of engineered neuronal networks grown in vitro
3. 学会等名 16th International Symposium on Nanomedicine (ISNM2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Sakaibara, H. Yamamoto, H. Murota, N. Monma, S. Sato, A. Hirano-Iwata
2. 発表標題 Enhanced modulation of spontaneous neural activity by interleukin-6 in micropatterned neuronal networks
3. 学会等名 16th International Symposium on Nanomedicine (ISNM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 D. Noe, H. Yamamoto, S. Sato
2. 発表標題 Parameter analysis for biologically plausible learning algorithms for recurrent SNNs: impact of dynamical and anatomical network properties
3. 学会等名 The 12th RIEC International Symposium on Brain Functions and Brain Computer (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 N. Monma, H. Yamamoto, H. Murota, S. Moriya, N. Fujiwara, A.Hirano-Iwata, S. Sato
2. 発表標題 Designing modular neuronal networks with directional connections to enhance dynamical complexity
3. 学会等名 The 12th RIEC International Symposium on Brain Functions and Brain Computer (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 H. Murota, H. Yamamoto, N. Monma, S. Sato, A. Hirano-Iwata
2. 発表標題 Modulation of neuronal ensembles by optogenetic stimulation in biological neuronal networks
3. 学会等名 The 12th RIEC International Symposium on Brain Functions and Brain Computer (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山本英明
2. 発表標題 神経細胞ネットワークの機能を理解し応用するための神経工学技術
3. 学会等名 Beyond AIワークショップ「培養ニューロンの機能と未来」(招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 遠藤壮太, 山本英明, 西村周泰, 酒井原一守, 門間信明, 正水芳人, 平野愛弓, 佐藤茂雄
2. 発表標題 脳領域間結合のin vitro再構成に向けたマイクロ流体デバイスの開発
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yoichiro Tanaka
2. 発表標題 Magnetic data storage technology; from the invention of perpendicular magnetic recording (PMR) to computational storage
3. 学会等名 Computational I/O Stack Workshop, UCSC (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川田悠貴、田中陽一郎
2. 発表標題 脳神経構造可視化ツールを用いた分散ストレージCephのデータアクセス性能の評価検討
3. 学会等名 日本磁気学会第46回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中陽一郎、Simon Greaves
2. 発表標題 次世代スマート社会を推進する情報ストレージの展望
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川田悠貴、田中陽一郎
2. 発表標題 脳神経構造可視化ツールを用いた分散ストレージCephのデータアクセス性能の評価検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 磁気記録・情報システム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中陽一郎、川田悠貴、サイモン グリーブス
2. 発表標題 分散ストレージシステムの性能とスマート社会実装に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 磁気記録・情報システム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 酒井原 一守, 山本 英明, 佐藤 茂雄, 平野 愛弓
2. 発表標題 炎症性サイトカインによる神経活動変調効果のin vitroモデリング
3. 学会等名 Neuro2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 門間 信明, 山本 英明, 守谷 哲, 平野 愛弓, 佐藤 茂雄
2. 発表標題 モジュール間結合に指向性を有する人工神経細胞回路の作製と自発活動解析
3. 学会等名 第83回秋季応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Sakaibara, H. Yamamoto, H. Murota, S. Sato, A. Hirano-Iwata
2. 発表標題 In vitro modeling of neural activity modulation induced by interleukin-6
3. 学会等名 The 11th RIEC International Symposium on Brain Functions and Brain Computer (BFBC2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 N. Monma, H. Murota, H. Yamamoto, A. Hirano-Iwata, S. Sato
2. 発表標題 In vitro reconstruction of artificial neuronal networks with oriented inter-modular connections
3. 学会等名 The 11th RIEC International Symposium on Brain Functions and Brain Computer (BFBC2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 酒井原一守, 山本英明, 室田白馬, 佐藤茂雄, 平野愛弓
2. 発表標題 マイクロパターン培養神経回路を用いた炎症性サイトカインによる神経活動変調効果のin vitroモデリング
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川田悠貴、田中陽一郎
2. 発表標題 脳神経細胞構造可視化アプリケーションを用いた 大容量ストレージシステムのデータアクセス性能の評価検討
3. 学会等名 2021 年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 YOICHIRO TANAKA
2. 発表標題 Data Storage Consideration in Brain Inspired Application
3. 学会等名 Brain-Inspired Computing: Physics, Architectures, Materials and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 YOICHIRO TANAKA
2. 発表標題 Computational Storage Platform for Brain Neural Structure Analytics
3. 学会等名 RIEC International Symposium Symposium of Yotta Informatics Research Platform for Yotta-Scale Data Science 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 YOICHIRO TANAKA
2. 発表標題 In Storage/Memory Computing Platform for Brain Neuro Science
3. 学会等名 FY 2021 RIEC Annual Meeting on Cooperative Research Projects (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Yamamoto, T. Sumi, S. Sato, A. Hirano-Iwata
2. 発表標題 Ultrasoft silicone elastomer as a biomimetic scaffold for neuronal cultures
3. 学会等名 European Materials Research Society (E-MRS) 2021 Spring Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Yamamoto, T. Sumi, S. Sato, A. Hirano-Iwata
2. 発表標題 Ultrasoft polydimethylsiloxane as a biomimetic scaffold for neuronal cultures
3. 学会等名 8th Japan-China Nanomedicine Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本英明, 竹室汰貴, 住 拓磨, 佐藤有弥, 守谷 哲, 平野愛弓, 佐藤茂雄, J. Soriano
2. 発表標題 神経回路機能のin vitro操作のためのバイオ界面制御技術
3. 学会等名 第44回日本神経科学大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹室汰貴, 山本英明, 脇村 桂, 住 拓磨, 金野智浩, 佐藤茂雄, Jordi Soriano, 平野愛弓
2. 発表標題 マイクロパターン培養神経回路に対する光摂動系の構築
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤有弥, 山本英明, 竹室汰貴, 住 拓磨, 酒井原一守, 谷井孝至, 佐藤茂雄, 平野愛弓
2. 発表標題 多点電極アレイ上でのモジュール構造型培養神経回路のパターニング
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 住 拓磨, 山本英明, 守谷 哲, 竹室汰貴, 金野智浩, 佐藤茂雄, 平野愛弓
2. 発表標題 リザーブ計算に基づく人工神経細胞回路のパターン分類特性の評価
3. 学会等名 第31回日本神経回路学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本英明, 平野愛弓, 佐藤茂雄
2. 発表標題 バイオ界面制御による神経回路機能の人工再構成
3. 学会等名 薄膜材料デバイス研究会第18回研究集会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Yamamoto, T. Takemuro, N. Monma, S. Sato, A. Hirano-Iwata
2. 発表標題 Polydimethylsiloxane microfluidic films for in vitro engineering of mesoscale neuronal networks
3. 学会等名 14th International Symposium on Nanomedicine (ISNM2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本英明, 平野愛弓, 佐藤茂雄
2. 発表標題 Dynamical richness defined by modular organization in engineered neuronal networks
3. 学会等名 第99回日本生理学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Yamamoto, T. Sumi, T. Takemuro, S. Moriya, S. Sato, A. Hirano-Iwata
2. 発表標題 Artificial reconstitution of neuronal network functions with living cells
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Neuromorphic AI Hardware (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 門間信明, 山本英明, 竹室汰貴, 守谷 哲, 藤本ありさ, 本田 渉, 平野愛弓, 佐藤茂雄
2. 発表標題 薄膜型マイクロ流体デバイスを用いた神経細胞モジュール間の結合指向性制御
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 室田白馬, 山本英明, 竹室汰貴, 門間信明, 佐藤茂雄, 平野愛弓
2. 発表標題 神経アンサンプルの機能特性のin vitroモデリングに向けた薄膜型マイクロ流体デバイスの作製
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中陽一郎
2. 発表標題 ライフサイエンス大規模データ解析に向けたコンピューショナル・ストレージ
3. 学会等名 IoT/AI時代におけるオープンイノベーション推進協議会 第5回シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoichiro Tanaka
2. 発表標題 Computational storage platform for brain neural structure visualization analytics
3. 学会等名 RIEC International Symposium, Symposium of Yotta Informatics Research Platform for Yotta-Scale Data Science 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Tanaka, Y. Kawada, Y. Bando, S. Greaves
2. 発表標題 In-Storage/Memory Computing Platform for Brain Neuro Science
3. 学会等名 Center for Nation-Wide Cooperative Research on ICT, FY 2020 RIEC Annual Meeting on Cooperative Research Projects, "Compass for Next-Gen ICT" Program
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本英明, 住拓磨, 佐藤茂雄, 平野愛弓
2. 発表標題 脳組織に近い弾性率を有するシリコン樹脂の生体界面材料応用
3. 学会等名 応用物理学会有機分子・バイオエレクトロニクス分科会研究会「ここまで進んだ有機分子・バイオエレクトロニクス研究」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹室 汰貴, 山本 英明, 佐藤 茂雄, 平野 愛弓
2. 発表標題 薄膜型マイクロ流路を用いた微小神経細胞回路のパターン培養
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Yamamoto, T. Sumi, A. Hirano-Iwata, S. Sato
2. 発表標題 Ultrasoft silicone gel as a biomimetic scaffold for culturing neuronal networks in vitro
3. 学会等名 9th RIEC International Symposium on Brain Functions and Brain Computer (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Sumi, H. Yamamoto, S. Moriya, T. Takemuro, S. Sato, A. Hirano-Iwata
2. 発表標題 Reservoir computing properties in spiking neural network models with modular topology
3. 学会等名 9th RIEC International Symposium on Brain Functions and Brain Computer (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Yamamoto, A. Hirano-Iwata, S. Sato,
2. 発表標題 Designing functional neuronal networks with living cells
3. 学会等名 Asia South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 住拓磨, 山本英明, 竹室汰貴, 守谷哲, 佐藤茂雄, 平野愛弓
2. 発表標題 In silico/in vitro神経回路におけるリザーバ計算特性のモジュール構造依存性
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 田中陽一郎、ほか (共著)	4. 発行年 2023年
2. 出版社 株式会社エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 676
3. 書名 スピントロニクスハンドブック 基礎から応用まで	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山本 英明 (Hideaki Yamamoto) (10552036)	東北大学・電気通信研究所・准教授 (11301)	
研究分担者	グリーブス サイモン・ジョン (Greaves Simon) (60375152)	東北大学・電気通信研究所・准教授 (11301)	
研究分担者	平野 愛弓 (Ayumi Hirano) (80339241)	東北大学・電気通信研究所・教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
	米国	Seagate Technologies	Washington State University