

研究終了報告書

「Triturated Computing System (粉末コンピューティングシステム)」

研究期間：2018年10月～2021年7月, 2022年2月～2022年9月

研究者：三浦典之

1. 研究のねらい

「コンピュータのカタチは、エネルギー場のカタチによって決まる。」初期のデスクトップコンピュータが大型のタワー型で計算機室に固定されていたのは、壁掛けACコンセントから供給される50~60Hzの100~200Vの低周波交流電場をエネルギー源とし、大型のAC-DC変圧器を必要としたからである。その後、大きな静電場を閉じ込めることが可能な大容量バッテリーが発明されたことで、コンピュータは、バッテリーの形状に応じて、ノート、手帳、腕時計、指輪型などのカタチに形状を変え、持ち運びできるようになった。本研究では、コンピュータを駆動するエネルギー場の新たなカタチを探索・設計することで、コンピューティングシステムの新しいカタチを開拓した。コンピュータは、我々が暮らす物理空間と情報空間とをつなぐ境界接点に物理的な実体をもって必ず存在する。物理空間と情報空間の高度な融合を指向するSociety 5.0において、両空間の境界接点をなすコンピュータに求められる重要な要件の一つは、物理環境に負荷なく(Non-Invasive)無意識のうち(Unconscious)に溶け込むコンピュータの物理的なカタチにあると考える。そこで本研究では、自由な形状で物理環境との親和性を高めることができる極小コンピューティングシステムの開発を目指した。これにより、これまでコンピューティングシステムを導入することができなかった未開の物理環境を開拓することで、未解明の情報を獲得できる可能性がある。また、高度に物理環境に浸透することで、獲得できる情報の価値純度を向上し、情報処理の質的な転換を導くことも可能となる。さらに、情報を獲得した環境下でローカルに情報を瞬時処理することで、即応性を追求可能な高度な情報処理サービスが提供可能となる。人々がコンピューティングシステムに求めているのは、情報の処理速度や効率にあるのではない。人々が本質的に求めているのは、情報の価値である。これまでのような単なる情報処理性能の向上を目指すのではなく、取り扱う情報の価値を高める新たなカタチのコンピューティングシステム基盤を創出することが本研究の最終的なねらいである。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、物理環境との親和性を極限まで高めた0.1mm角級の目に見えないほどに極小の粉末コンピューティングシステム(Triturated Computing System: TCS)を開発した(図1)。TCSは、従来のシステムオンチップ(System on Chip: SoC)のように全ての計算機能要素をワンチップに集積する方向性とは異なり、アナログ、デジタル、メモリ、センサなどの機能ごとに0.1mm角級に粉末化したのちに無線ネットワークで粉末群を再統合することで、超小型高性能コンピューティングシステムを実現する。システムに取り込む粉末計算機能要素の種類と数量を増加させることにより、システム全体の機能と性能を幅広く拡張可能となる。また、この際に、電源バッテリー回路も粉末化してシステムに取り込むことで、計算機能要素群に対して粉

末バッテリー群から誘導結合を介して安定的に近接無線給電が可能となる。この無線給電用のエネルギー場上で、データ通信を行う誘導結合電力線通信 (Inductive-Coupling Power Line Communication: IC-PLC) により、複数の機能を有する粉末群を再統合して高性能コンピューティングシステムを構築する。本研究では、このような TCS を実現するための基盤技術として、「極小粉末デバイス実装技術」、「粉末チップ間近接無線給電・通信回路」を開発し、TCS の特徴を生かした「高性能粉末コンピューティングアーキテクチャ」および「同アルゴリズム」について総合的に研究した。さらに、領域アドバイザーの指導の下、TCS の将来展開を見据えた超小型コンピューティングシステムの有効な応用先を検討した。

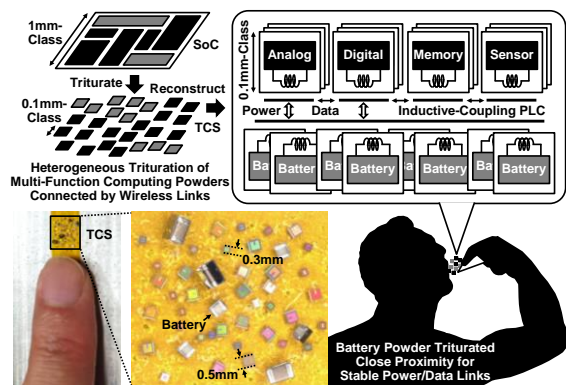


図1 粉末コンピューティングシステム

「高性能粉末コンピューティングアーキテクチャ」および「同アルゴリズム」について総合的に研究した。さらに、領域アドバイザーの指導の下、TCS の将来展開を見据えた超小型コンピューティングシステムの有効な応用先を検討した。

TCS は、「新たなエネルギー場によるコンピュータの新たなカタチ」を具現化したものである。この設計思想を拡張すると、「未利用のエネルギー場の発見による新たなカタチのコンピュータの創出」の可能性を見出すことができた。本研究では、未利用のエネルギー場として、半導体 IC 製造中の高エネルギープラズマを発見した。このプラズマをエネルギー源として、半導体 IC 製造中に動作する「胎動回路 (Fetal-Movement Circuit: FMC)」を考案し(図 2)、応用例として、半導体 IC 製造中に物理的に複製できない関数 (Physically Unclonable Function: PUF) の自己プログラミングを自律実行する回路を考案し、プロトタイプによるデモ実証に成功した。TCS および胎動回路に関する研究成果をまとめた論文 2 編は、「半導体のオリンピック」と呼ばれる半導体 IC 設計分野の世界最高峰の国際会議 International Solid-State Circuits Conference (ISSCC) に採択された[1,2]。

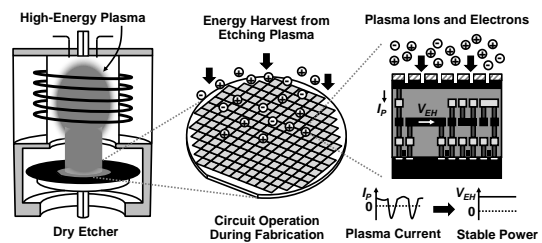


図2 胎動回路の概念図

(2) 詳細

研究テーマ A「極小粉末デバイス実装技術」

0.1mm 角級に極小粉末化された半導体 IC デバイスを大面積のシリコンウェハから削り出すために、本研究では、レーザーステルスダイシング技術を利用して、非常に少ない面積ペナルティで安定的なデバイス粉末化を実現した(図 3)。集光したパルスレーザーにより形成したウェハ結晶内の欠損をきっかけとする劈開(へきかい)により、少ないダイシングマージンで、機械的・電気的な特性へのストレスを与えずに粉末デバイスを実装できる。無線給電のコア回路となるコ

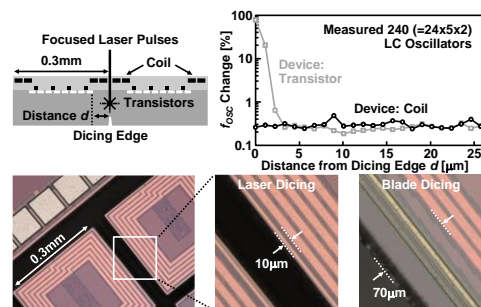


図3 極小粉末チップダイシング技術

イルで形成されるLC発振器での事前実験において、コイルとレーザーダイシングラインのマージンは、限りなく0に近づけられることを明らかにした。そこで、粉末チップ外周にコイルを配置しコイル直径を最大化することで、給電・通信レンジを最大化し、かつコイルを粉末チップの機械的強度を高めるシールリングとして活用する物理レイアウト手法の有効性を確認した。

また、TCSの給電源となる粉末バッテリーチップを0.1mm角級で実装するため、0603や1005サイズの0.1mm角級ディスクリートコンデンサと無線送電回路チップを直接フリップチップ実装する技術を確認した(図4)。60 μ m厚まで薄膜化した0.1mm角級の無線送電回路チップをコンデンサに直接ダイボンドする。チップ側の接合部分としては、25 μ m幅の狭小パッドのみで、チップ面積の消費は少ない。

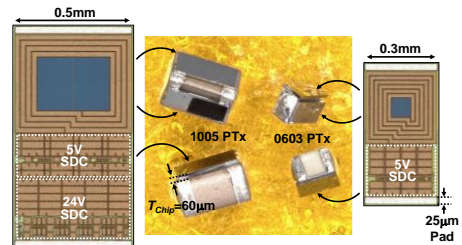


図4 粉末バッテリーチップ

高耐压のコンデンサに高電圧状態でエネルギーを蓄積し、チップ上に搭載した降圧回路(Step-Down Converter: SDC)で低電圧化しながら、同チップ上のLC発振器でコイルに磁界を発生して長時間無線給電できる。チップの薄膜化で、磁界は損失なくシリコン基板を貫通でき、コンデンサの直交する2面にチップを接合することで給電範囲を三次元的に拡張できる。

研究テーマB「粉末チップ間近接無線給電・通信回路」

粉末チップ群をTCSへと再統合するための近接無線給電・通信ネットワークとして、誘導結合電力線通信(IC-PLC)トランシーバ回路を考案した(図5)。回路構成は、極めてシンプルなトポロジーであり、計算機要素粉末や電源バッテリー粉末などの機能によらず、対称な構造である。電力トランシーバとなるクロスカップルインバータは、LC発振器用の負性抵抗として無線送電回路コアとも、AC-DC変換用の全波整流器として無線受電回路コアとしても機能する。これにより、粉末チップの機能によらず1つのコイルを無線送受信で共有することができるため、粉末チップの外周と同じサイズの大きな直径のコイルを利用して給電・通信レンジを最大化できる。無線データトランシーバ回路もスイッチやインバータで構成される極めてシンプルなオールモストデジタル回路である。4GHz近辺の高周波RF帯で無線給電を行い、供給された無線給電源に対して直接ベースバンドのデジタルデータで変調をかけ、電力線通信を確立できる。図6に示したように、位置合わせ用のマニュアルプローバを利用して粉末チップ評価システムを構築し、提案IC-PLCトランシーバの機能動作を実証し、給電・通信性能を評価した。同システムで、1mW級の無線給電と1Mb/s級の無線通信を同時に実現する誘導結合電力線通信を実機実証した。

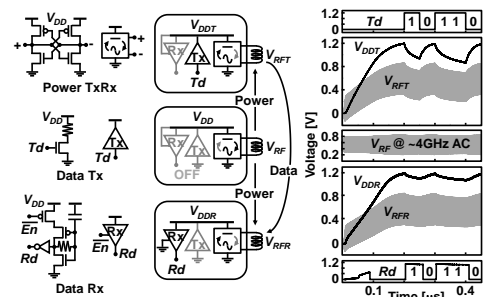


図5 IC-PLCトランシーバ回路

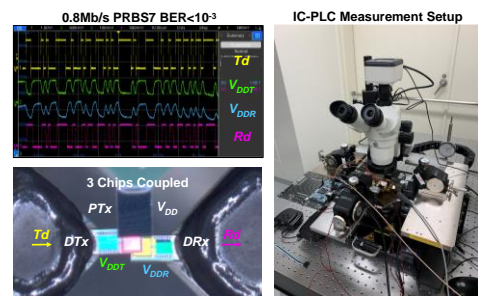


図6 IC-PLCトランシーバ評価システム

図6に示したように、位置合わせ用のマニュアルプローバを利用して粉末チップ評価システムを構築し、提案IC-PLCトランシーバの機能動作を実証し、給電・通信性能を評価した。同システムで、1mW級の無線給電と1Mb/s級の無線通信を同時に実現する誘導結合電力線通信を実機実証した。

研究テーマ C「高性能粉末コンピューティングアーキテクチャ」

TCS では、異なる機能要素ごとに物理的にチップが粉末化されており、機能に応じて最適な半導体製造プロセスを選択できるヘテロロジーニアスインテグレーション(異種集積)に適している。粉末バッテリーチップでは、長時間の無線給電を可能とするために、コンデンサに高電圧でエネルギーを蓄積する。蓄電エネルギーは、 CV^2 に比例するためである。そこで、無線送電回路チップでは、高耐圧デバイスを

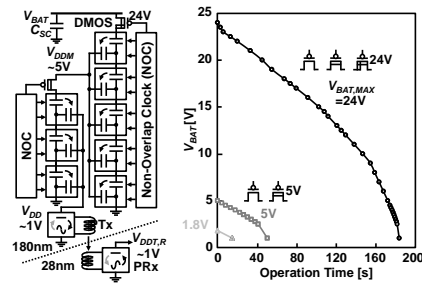


図7 ヘテロロジーニアス粉末アーキテクチャ

利用できるプロセスを選択し、無線給電下で動作する計算機能要素粉末チップでは、低電圧動作可能な、より微細なデバイスを利用できるプロセスを選択する。このヘテロロジーニアス粉末アーキテクチャにより、TCS の稼働時間を大幅に延長できる(図 7)。本研究では、24V の高耐圧デバイスが利用できる 180nm DCMOS プロセスで無線送電回路チップを製造し、計算機能要素チップは、1V 以下でも動作可能な 28nm CMOS プロセスで製造した。最先端のスーパーキャパシタを使用した場合の推定性能では、このヘテロロジーニアスアーキテクチャにより 1 つの粉末バッテリーチップで、稼働時間を 180 秒まで延長できることを確認した。

本研究では、TCS のデモ実証プロトタイプとして粉末の温度計測システムを構築した。温度センサ回路として、トランジスタの閾値電圧以下で動作するサブスレッシュホールド BGR (Band-Gap Reference) 回路を採用した(図 8)。抵抗素子を一切利用しないため、トランジスタの微細化によって面積を大幅に縮小できる。実際

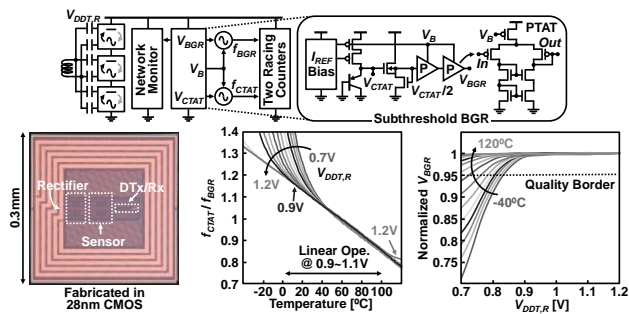


図8 粉末温度センサチップ

に、同回路は、180nm から 28nm にスケールアップすることで、30 分の 1 の面積に縮小でき、0.3mm 角の粉末温度センサチップにその他の無線受電回路、データトランシーバ回路とともにコンパクトに集積することができた(図 8)。ここにもヘテロロジーニアス粉末アーキテクチャが生かされている。温度計測は、温度変化しない BGR 出力電圧と BGR 生成過程で生じる温度に逆比例する CTAT (Complementary To Absolute Temperature) 電圧の比較により実現する。ばらつきのある無線給電下でもロバストに動作できるように、電圧比較は、2 つの弛緩発振器ペアの発振周波数比較により実現した。図 8 に示したように、実際に広い電圧・温度範囲での正常動作を実証できた。

研究テーマ D「高性能粉末コンピューティングアルゴリズム」

TCS では、計算機能要素に利用できる面積の制約からくる性能の低下と、ばらつきのある無線給電下での性能の不安定化を粉末チップの冗長化によりカバーすることができる。課題は、動的に変動する動作状況の変化を効率よく検知して、冗長化された粉末群から価値ある情報を抽出するためのアルゴリズムにある。本研究では、TCS と回路システムレベルで連携して機能する「価値駆動型コンピューティングアルゴリズム」を提案した。図 8 の温度センサ回路にお

いて、BGR 出力は、給電・通信ネットワークの品質モニタとして機能する。ネットワークの強度低下は、無線給電の低下につながる。正常時は安定している BGR 出力電圧の急激な低下をネットワーク品質の低下として容易に検知することができる。この情報を利用すれば、粉末温度センサチップは、自身の動作環境を自律認識することが可能となり、計測精度の劣化の可能性を自己判断して動作を停止することで、TCS 全体の稼働時間を延長できるだけでなく、システム全体での計測情報の価値を向上することができる(図 9)。温度センサの実測性能から推定した粉末温度センサシステムとしての計測精度が、ネットワーク品質モニタの情報を使うことで大幅に改善できることを確認した。

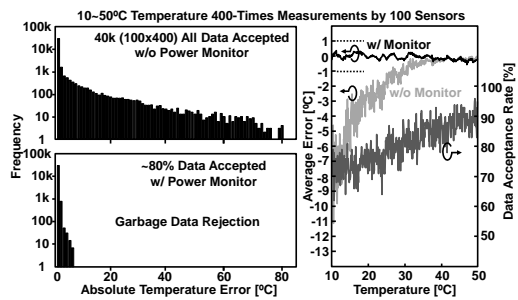


図9 価値駆動型コンピューティング

また、TCS のような物理環境調和型のコンピューティングシステムの有効な応用を検討した。本研究では、fMRI などの大型かつ非日常的な装置に頼らず、日常空間で使用できる身体負荷の少ない感情計測システムを考え、身体負荷低減による計測情報の価値改善の効果を評価した(図 10)。フィージビリティスタディとして、本研究では、表情、皮膚電気活動 (Electro Dermal Activity: EDA)、光電容積脈波 (Photoplethysmogram: PPG)、脳波 (Electroencephalogram: EEG) をマルチモーダルで計測し、これらの生体計測データから抽出した特徴量を用いて機械学習により感情を計測するプラットフォームを構築した。機械学習の可視化機能を利用して、各特徴量の感情推定への貢献度を評価し、貢献度の高いセンサを選別した。低貢献度センサの削減による身体負荷低減の効果が感情推定精度の改善に資する可能性があることを確認した。以上の研究テーマ A~D の成果をまとめた論文が、ISSCC に採択された[1]。

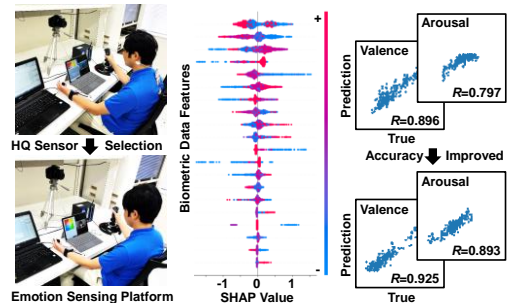


図10 感情計測における高価値センサ選択

本研究では、表情、皮膚電気活動 (Electro Dermal Activity: EDA)、光電容積脈波 (Photoplethysmogram: PPG)、脳波 (Electroencephalogram: EEG) をマルチモーダルで計測し、これらの生体計測データから抽出した特徴量を用いて機械学習により感情を計測するプラットフォームを構築した。機械学習の可視化機能を利用して、各特徴量の感情推定への貢献度を評価し、貢献度の高いセンサを選別した。低貢献度センサの削減による身体負荷低減の効果が感情推定精度の改善に資する可能性があることを確認した。以上の研究テーマ A~D の成果をまとめた論文が、ISSCC に採択された[1]。

研究テーマ E「胎動回路」

TCS の拡張概念として、利用可能な既存のエネルギー場を逆探索し、未開拓の場に挿入可能なコンピューティングシステムの新たなカタチを開拓した。本テーマでは、図 2 に示した半導体製造時のプラズマをエネルギー源として製造中に「胎動回路」を考案した。半導体の製造時には、特にパターンエッチング時に高エネルギーのプラズマイオンをターゲットに打ち付けることで膜を研削する。正に帯電したプラズマイオンは、電気的エネルギーの注入と見なすことができ、このエネルギーから安定的な低電圧を生成することで、半導体製造中に動作する「胎動回路」を実現できる。本研究では、金属配線のエッチング時のプラズマイオンからのエネル

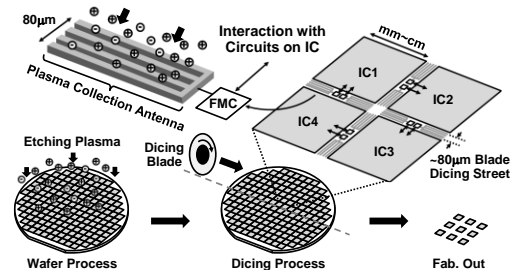


図11 胎動回路の物理レイアウト手法

ギーのプラズマイオンをターゲットに打ち付けることで膜を研削する。正に帯電したプラズマイオンは、電気的エネルギーの注入と見なすことができ、このエネルギーから安定的な低電圧を生成することで、半導体製造中に動作する「胎動回路」を実現できる。本研究では、金属配線のエッチング時のプラズマイオンからのエネル

ギー獲得手法を考案した。トランジスタゲートの破壊を引き起こす「アンテナ効果」として知られるプラズマイオン注入現象を逆手にとって有効に活用している。さらに獲得できるエネルギーを最大化するために、パターン研削時に側壁から注入するイオン電流の収集量を最大化する櫛型アンテナを提案した(図 11)。また、対象となるエネルギー獲得回路は、未使用領域のダイシングストリートに配置するレイアウト手法も提案した。

本研究では、この胎動回路の応用例の一つとして、半導体製造中にプラズマから獲得したエネルギーを PUF のプログラミングに利用した。トランジスタ酸化膜の破壊を可能とする高エネルギー現象の特徴を生かして、破壊個所を PUF 出力とする回路方式を考案した。酸化膜破壊エネルギーのレベルは、トランジスタのゲート酸化膜の膜質に依存するため、

製造プロセスのばらつきに依存する。このような人為的に制御できない物理現象は、PUF の情報エントロピー源となる。酸化膜破壊型の PUF では、明示的な電氣的破壊現象を伴うため、非常に安定的に PUF 出力を生成できる。従来も酸化膜破壊を利用した PUF が提案されているが、酸化膜を破壊するために大きな面積を消費する高電圧発生回路が必要だった。胎動回路では、高電圧発生回路に代わる高エネルギーをプラズマから獲得でき、かつこのための回路は未使用のダイシングストリートに配置できるため、面積消費を著しく削減できる。本研究では、複数の酸化膜破壊 PUF 用のトランジスタセルアレイを配置し、2つのプラズマイオンエネルギー収集アンテナを利用して、一方を酸化膜破壊用、もう一方を破壊セルの順次選択用回路の駆動源とする胎動回路デモ機を作成した。図 12 に示したように、半導体製造中にエネルギーを獲得して、自律的に酸化膜破壊を逐次実行する自己プログラミング型の PUF 回路の動作を実証した。以上の研究テーマ E の成果をまとめた論文も ISSCC に採択された[2]。

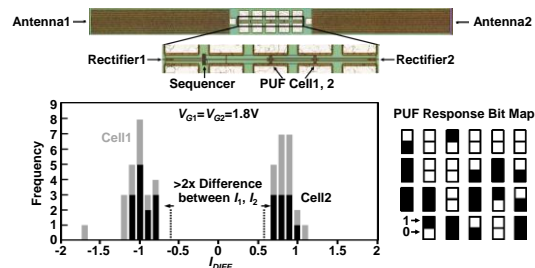


図12 胎動回路のPUF応用

3. 今後の展開

本研究で開発した粉末コンピューティングシステム実現のための基盤技術研究成果は、日常空間で常時利用できる人体負荷の少ない感情推定やストレス検知システムなどへの応用が期待できる技術である。実際に、2021年に内閣府ムーンショット型開発事業の中で実施された追加の目標策定のためのミレニア・プログラムにおいて、このような着想に基づく人の「こころ」に寄り添うテクノロジーの重要性を主張して目標9策定に貢献した。技術的には、粉末センによる生体情報計測データを感情推定応用に利用可能なレベルまで高精度化し、人体適合性をクリアすれば、10年程度のスパンで社会実装できる可能性がある。また、これ以外にも、食品の品質を管理するセンサ付きタグとしての応用も検討している。食品を毀損せず物理的なセキュリティ耐性も高い超小型タグを JST 共創の場形成支援プログラム(COI-NEXT)の中で研究開発しており、10年以内の実用化を目指している。また、追加研究テーマとして実施した胎動回路は、実際に応用例を示した PUF 回路については、すでに実用段階にある。半導体製造中に動作する回路機能の応用は多岐にわたり、今後数年のスパンで、PUF 以外の応用先を検討・開発していく予定である。粉末コンピューティングシステム、胎動回路ともに基本特許を出願し、関連企業との意見交換を通じて、具体的な社会実装へとつなげる活動を続けている。

4. 自己評価

研究申請段階で目標とした粉末コンピューティングシステムに関する研究テーマ A~D の技術提案とその実現性検証は、目標通りに全て達成した上で、研究過程での着想に基づく胎動回路について、追加の技術提案とその効果の実機実証を達成しており、本研究申請時の期待以上の成果が得られていると自負している。また、それぞれの研究成果が世界最高峰の国際会議 ISSCC に 2 編の論文として採択された。ISSCC は、Google Scholar Citations のインパクトファクターランキングで、Computer Hardware Design カテゴリで最高のスコアを有する半導体集積回路設計分野での世界最高峰のトップカンファレンスであり、「半導体のオリンピック」とも呼ばれる。採択された 2 編の論文は、将来技術を議論する Technology Directions (TD) Subcommittee の分野の中で、未来のイノベーションを議論する特別なセッションに採択されており、対外的な評価も非常に高い。

一方でコロナ禍に伴い、実地作業が必要な実証実験には困難があり、実験成果を主体とする本研究においては、活動が困難な時期が半年程度あり研究計画に遅れが生じた。さらに、異動・昇進、子供の出生・育児が重なり、当初の研究期間中に半年間の研究中断と延長も行った。本来であれば、従来の研究期間中のもっと早い時期に對外成果を出し、社会実装を目指した応用研究へと発展させる予定だったが、十分な活動ができなかった。また、上記理由もあり、研究期間中は自身のプロジェクトの目標達成に注力する必要性があり、領域研究者間の連携に基づく大型研究プロジェクトへの発展的活動を満足に実施することができなかった。今後も続く領域会議の活動には、終了者として積極的に参加し、研究期間中に達成できなかった領域内での連携を活発化していきたい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:6件

1. N. Miura, K. Naruse, J. Shiomi, Y. Midoh, T. Hirose, T. Okidono, T. Miki, and M. Nagata, "A Triturated Sensing System," ISSCC Digest of Technical Papers, 2023. 掲載決定
粉末コンピューティングシステムを実現するためのデバイス実装、回路、アーキテクチャ、アルゴリズムレベルの基盤技術を総合的にまとめ、その代表的な応用例として粉末センサシステムをデモンストレーションした論文である。具体的には、本研究プロジェクトの研究テーマ A~D の内容が網羅的にまとめられている。ISSCC の中でも TD とよばれる分野で、将来技術として高く評価されて採択されている。
2. K. Naruse, T. Ueda, J. Shiomi, Y. Midoh, and N. Miura, "A Self-Programming PUF Harvesting the High-Energy Plasma During Fabrication," ISSCC Digest of Technical Papers, 2023. 掲載決定
半導体製造時の材料加工に使用している高エネルギープラズマをエネルギー源として半導体製造中に動作する「胎動回路」の新概念を提唱し、この回路の PUF 応用に関する技術提案とそのデモ実証結果についてまとめた論文である。具体的には、本研究プロジェクトの研究テーマ E の成果がまとめられている。[1]の論文と同様に、TD 分野に採択され、将来性の高い技術として高く評価されて採択されている。

3. 三浦典之, “[解説論文]情報空間と物理空間をつなぐ集積システムのカタチ,” 電子情報通信学会 Fundamental Review, 2023, Vol. 16, No. 3, pp.147-155.
Society 5.0 に代表される情報空間と物理空間の融合に資するコンピューティングシステムのあるべきカタチについて解説した論文であり、本研究プロジェクトの着想とその成果を一つの実現例として示している。具体的な例として、感情推定への超小型コンピュータの応用の必要性和計測装置による物理的な人体負荷の低減の効果を議論している。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 2 件 (特許公開前のものも含む)

1	発 明 者	三浦 典之
	発 明 の 名 称	回路システム
	出 願 人	大阪大学
	出 願 日	2023/1/31 (出願予定)
	出 願 番 号	Xxxxxxx
	概 要	粉末コンピューティングシステムを実現するための基盤技術として考案した各階層の研究テーマ A~D の開発技術をまとめた特許提案である。出願に向けた特許明細書の執筆を完了しており、1 月末日に出願予定である。
2	発 明 者	三浦 典之
	発 明 の 名 称	回路システム、半導体製造方式
	出 願 人	大阪大学
	出 願 日	2023/1/31 (出願予定)
	出 願 番 号	Xxxxxxx
	概 要	胎動回路の概念とそれを応用した PUF 回路およびその他の応用可能例に関して研究テーマ E において開発した技術をまとめた特許提案である。出願に向けた特許明細書の執筆を完了しており、1 月末日に出願予定である。

(3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

[受賞] 三浦典之, 丸文財団平成 30 年度丸文研究奨励賞, “配線と回路の近接電磁界相互作用の LSI システムへの応用,” 丸文財団, 2019 年 3 月.

[報道] “コンピューターのむ日も近い?” 朝日新聞, 2021 年 3 月.

[特別招待講演] 三浦典之, “近接電磁場設計と先端実装技術に基づく新たなコンピュータのカタチ,” 第 41 回ナノテストングシンポジウム, 2021 年 10 月.

[基調講演] 三浦典之, “サイバー空間とフィジカル空間の接点: 集積システムのあるべきカタチ,” 第 196 回システムと LSI の設計技術研究発表会, 2021 年 12 月.

[招待講演] Noriyuki Miura, “Emerging Computing Systems Utilizing Electro-Magnetic Near-Field Connectivity,” 2022 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology, Aug. 2022.

[受賞] Noriyuki Miura, “IEEE Solid-State Circuits Society Distinguished Lecturer,” IEEE Solid-State Circuits Society, Jan. 2023.