

令和 2 年 9 月 7 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02337

研究課題名(和文) 群知能シリコンの創出とIoTセンサネットワークへの展開

研究課題名(英文) Creation of swarm intelligence silicon and deployment to IoT sensor networks

研究代表者

益 一哉 (Masu, Kazuya)

東京工業大学・その他・学長

研究者番号：20157192

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,900,000円

研究成果の概要(和文)：群知能センサネットワークの肝となる技術として集団同期現象を基盤としたシリコンCMOS通信ハードウェアと機能発現のためのセンサネットワークシステム設計を行った。超低消費電力な無線通信回路やバッテリーレスでのセンシングに成功したばかりではなく、複数の発振器の結合、つまり集団同期によるカオス信号生成やセンシング・機能発現を実測により確認できた。したがって、本研究の目的は概ね達成できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

集積回路技術の最小加工寸法がサブ10nm領域に入るとこれまでの単なる微細化、高性能化が全てではなくなってきた。アプリやシステムを念頭においた研究開発をすべきであると言われてきたが、学術的な切り口が不明であった。本研究は、Swarm Electronicsという切り口を持って、集積回路技術という部品レベルからシステムやアプリまでの異なる階層を繋げる解を与えることを目的とした。技術的独創性は、各センサノードの結びつきに「集団同期現象」の概念を取り入れることで、低消費電力と通信性能を確保したネットワークを構成する点である。試作や測定を通して、この可能性を実証できたことが本研究の成果である。

研究成果の概要(英文)：As a core technology of swarm intelligence sensor network, this work designed silicon CMOS communication hardware and the sensor network system for function expression based on collective synchronization phenomenon. We succeeded in sensing wireless communication circuits with ultra-low power consumption and battery-less, and confirmed the measurement of chaos signal generation and sensing/function expression by coupling of multiple oscillators, that is, collective synchronization. Therefore, the purpose of this study was almost achieved.

研究分野：集積回路工学

キーワード：センサネットワーク

1. 研究開始当初の背景

IoT (Internet of Things) 時代ではモノが話し始める。集積回路技術のこれまでのたゆまない技術進歩により、何らかの情報を得るセンサ、センシングした情報や他からの情報に何らかの処理をして周りに伝える (通信) するといった機能をもったモジュールをあらゆるモノに取り付けることができるようになってきた。まさに話し始めている。図1に示すように、コンピュータだけが接続されていたネットワークに携帯をはじめとするモバイル端末が繋がっているばかりではなく、全てのモノがネットワークに繋がり始めている。

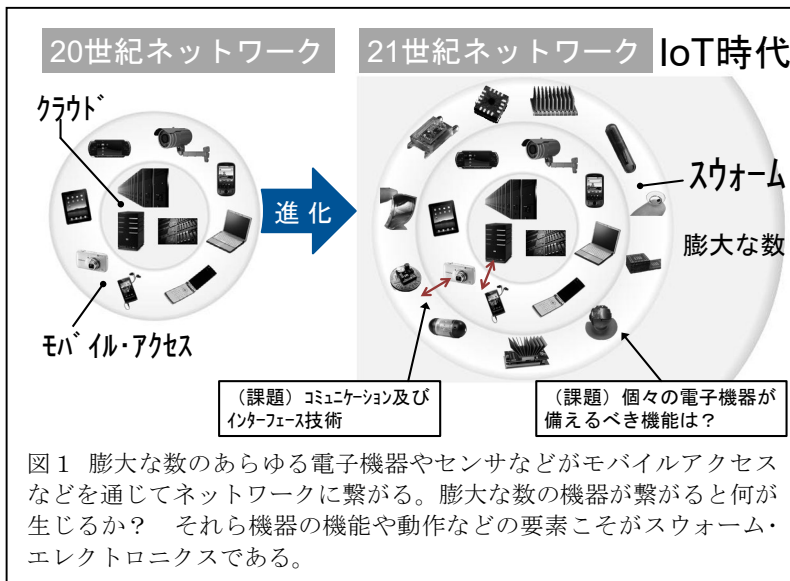


図1 膨大な数のあらゆる電子機器やセンサなどがモバイルアクセスなどを通じてネットワークに繋がる。膨大な数の機器が繋がると何が生じるか? それら機器の機能や動作などの要素こそがスウォーム・エレクトロニクスである。

環境や機器の状態を監視、モニターする目的でセンサが取り付けられそれらがネットワークを介してデータ伝送をしている「センサネットワーク」とは何が違うのだろうか? 「数」が多い。そこで、これらは最近「スウォーム (Swarm: 群)」と呼ばれ始めた[1]。これらスウォームを構成する機器 (agent) が単純でもデータをやりとりし始めて、大量のデータが行き来するようになると、個々のセンサや機器の信頼性が低くとも全体として信頼性の高いデータが得られるであろうと予想される。高速道路で前後の車との車間距離を取りさえすれば全体として渋滞が生じないという効用が生まれる状況や蟻の群れの行動等が **Swarm Intelligence** (群知能) と呼ばれることに端を発している。

申請代表者は、集積回路技術の高性能化を迫及することが、我が国が技術立国として世界をリードし続ける指導原理と確信を持って研究開発、教育に携わってきた。しかし、最小加工寸法がサブ 10nm 領域に入るとこれまでの単なる微細化、高性能化が全てではなくなってきた。アプリやシステムを念頭においた研究開発をすべきであると言われてきたが、学術的な切り口が不明であった。

本研究は、**Swarm Electronics** という切り口を持って、集積回路技術という部品レベルからシステムやアプリまでの異なる階層を繋げる解を与えることを目的とする。技術的独創性は、各センサノード (Swarm を構成する各 agent) の結びつきに「集団同期現象」の概念を取り入れることで、低消費電力と通信性能を確保したネットワークを構成する点である。

[1] <https://swarmmlab.eecs.berkeley.edu/>

2. 研究の目的

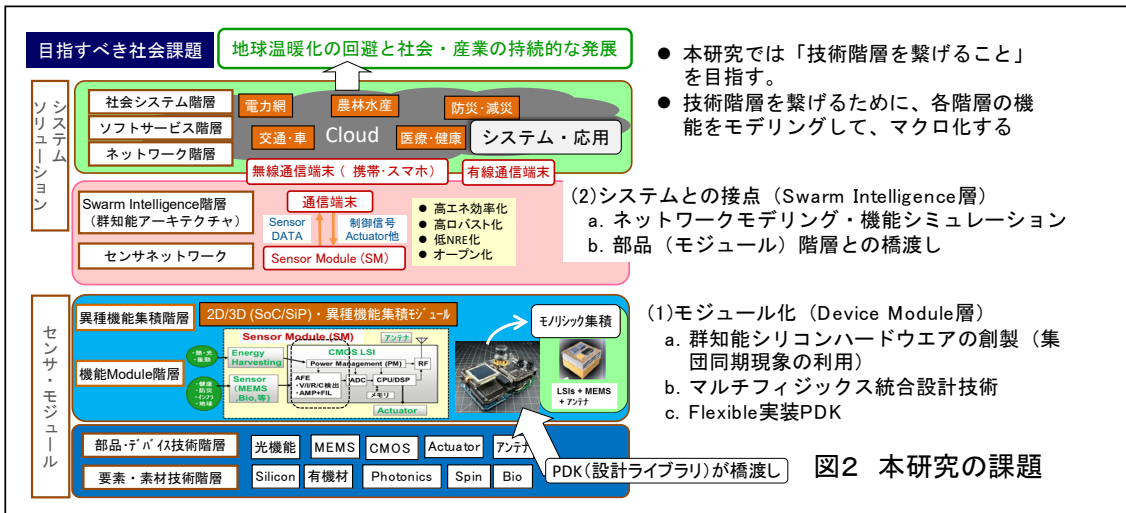
本研究では、群知能センサネットワークの肝となる技術として集団同期現象を基盤としたシリコン CMOS 通信ハードウェアと機能発現のためのセンサネットワークシステム設計を行う。部品からシステムまでの技術階層をそれぞれのモデル化マクロ化して技術階層の垣根を取りはらうことでこれを実現する。

3. 研究の方法

まず、CMOS 集積回路技術から社会課題解決までの技術階層を図2のように描いた。このように描くことで本研究の行うべき項目を浮かびあがらせることができた。本研究では以下の項目に大別して研究を行う。

(1) スウォーム (超小型自律分散電子機器) の創出 (モジュール化)

1. 自律動作に必須のバッテリーレス化を目指す MEMS 発電機的设计・試作 (マルチフィジックス統合設計環境構築、整備)
2. 集団同期現象を基にした低消費電力・群知能ネットワーク通信技術の開発
3. Si CMOS 集積回路設計・試作、動作評価



4. フレキシブルフィルム実装モジュール化 (特に PDK (Process Design Kit) 開発)
5. 超小型自律分散電子機器として、異種な機能をモノリシック集積した「群知能シリコン」の創製

(2) システムとの接点 (Swarm Intelligence 層) の構築

1. 「群知能シリコン」を利用した群知能センサネットワーク動作. 何かの事象が生じた時に Wake up してネットワーク全体が機能することを実証する.
2. センサネットワークのモデリングと機能シミュレーション: 環境情報収集におけるセンサネットワークの数学的なモデリングと、機能評価する.
3. センサネットワークの機能評価と部品 (群知能シリコン) との接点とするための、センサネットワーク評価指標と群知能シリコン機能のモデル化マクロ化を行う.

4. 研究成果

(1) スウォーム (超小型自律分散電子機器) の創出 (モジュール化)

1. 自律動作に必須のバッテリーレス化を目指す MEMS 発電機の設計・試作 (マルチフィジクス統合設計環境構築, 整備)

当研究室が保有する設計プラットフォームにおいて、MEMS 素子の統合設計環境を誰もが容易に使えるように整備した。MEMS 静電アクチュエータを統合設計した先行研究に基づき、無償の回路シミュレータ (LTspice) を用いて、加速度印可および機械的・電氣的挙動を表現する等価回路を新たに考案し、静電誘導型 MEMS 環境発電素子を構築する手法を構築した。本技術により、環境発電素子の発電量を増大するための解析パラメータを検討した。

発電機の効率を決める要素の一つであるパワーマネジメント回路における電圧検出回路に注力して開発を進めた。MOS トランジスタのサブスレッショルド領域における温度依存性をキャンセルする技術を開発し、サブナノワットで動作する電圧検出回路を実現した。

さらに、電力ハーベスティング回路部分の開発を進めた。ダイオードの閾値電圧による効率・感度低下の問題を改善するために、インピーダンス変換回路出力部の高インピーダンス化が必要となる。従来はディクソンチャージポンプを採用していたが、本研究では入力インピーダンスを高めやすいコッククロフト・ウォールトン回路を採用した。これにより、MEMS 素子だけではなく、無線電力のハーベスティングも可能となり、シミュレーションにおいて -32dBm の入力信号から 1V 以上の出力を得ることに成功した。

2. 集団同期現象を基にした低消費電力・群知能ネットワーク通信技術の開発
3. Si CMOS 集積回路設計・試作, 動作評価
4. フレキシブルフィルム実装モジュール化 (特に PDK (Process Design Kit) 開発)
5. 超小型自律分散電子機器として、異種な機能をモノリシック集積した「群知能シリコン」の創製

通信技術の開発, 集積回路設計・試作・動作評価, 実装・モジュール化, さらにモノリシック化に関しては, 相互に研究開発が密接に関係しているため, まとめて報告することにする。

複数発振器の集団同期 (注入同期) による発振周波数安定度などを計算するために, 定常

状態の周波数解析式を導出した。結合力が等しい場合は、ロック後の周波数が各発振器の周波数の平均値となる結果が得られた。減衰よりも信号の遅延がロック後の周波数に大きな影響を与えることがモデル式から判明した。

さらに、群知能シリコンを構成する要素技術の開発を進めた。2.4GHz帯のアンテナについては、遺伝的アルゴリズムを用いて逆F型アンテナの周波数帯域などを最適化する手法を開発した。群知能シリコンのプロトタイプとして、発振器型RF送信機、発振器型センサ回路、RFエネルギーハーベスティング(RF-EH)回路を開発した。180nm Si CMOS プロセスを用いて設計・試作し、RF送信機、発振器型センサ回路、RF-EH回路、電圧検出回路を測定し、凡そ設計通りに動作することを確認した。

これらの研究の過程で、発振器の結合により群知能的なカオス信号が生成できることに着目し、シンプルかつ用途の広い結合発振回路技術の開発も進めた(図3)。まずは原理検証のために、3つのリング発振器の結合強度とリンケージを制御しながら、それらを互いに競合させる構成を提案した。180nm Si CMOS プロセスにより集積回路を試作し、モジュールを開発した。実測により、生物学的ニューロンに似た特徴を有するスパイク列や、ノイズ様の信号など多種類の信号が生成できることを見出した。これによって、群知能を活用したセンシングの重要な知見が得られた。

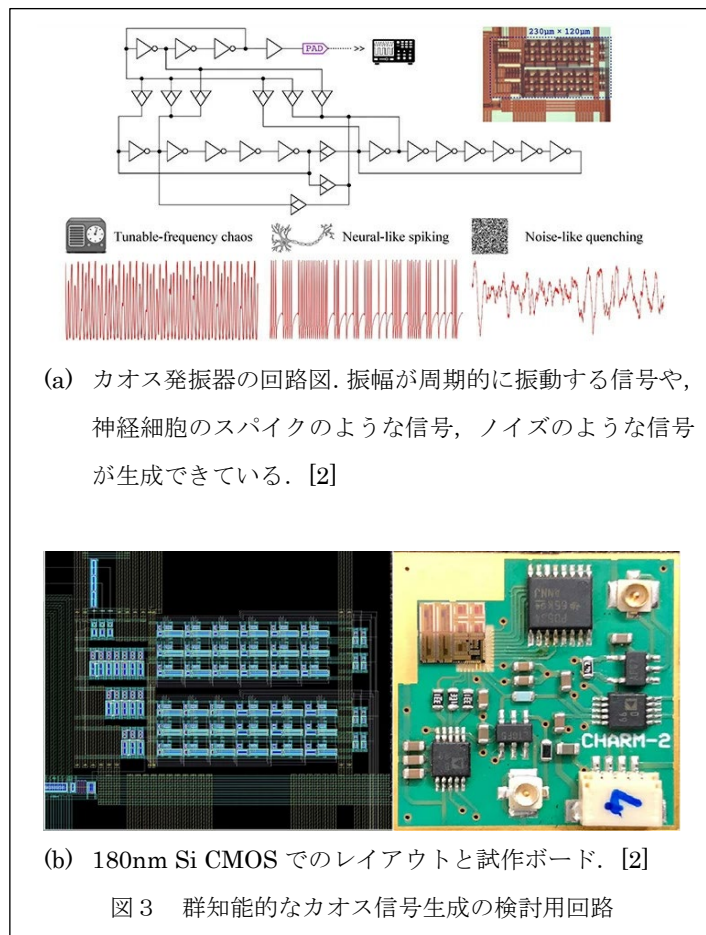
[2] L. Minati, et al., IEEE Access, Vol. 7, pp. 54638 - 54657, April 2019.

(2) システムとの接点 (Swarm Intelligence 層) の構築

1. 「群知能シリコン」を利用した群知能センサネットワーク動作。何かの事象が生じた時にWake upしてネットワーク全体が機能することを実証する。
2. センサネットワークのモデリングと機能シミュレーション: 環境情報収集におけるセンサネットワークの数学的なモデリングと、機能評価する。
3. センサネットワークの機能評価と部品 (群知能シリコン) との接点とするための、センサネットワーク評価指標と群知能シリコン機能のモデル化マクロ化を行う。

当初は3つの内容に大別し研究を進めていたが、研究の過程で相互が密に関係しているため内容の明確な切り分けが困難であることを認識した。したがって、以下では成果をまとめて記述する。

Wake-up 機能を実現する方法として、無線給電により動作するバッテリーレスセンサモジュールの研究開発を進めた。特に高周波で動作するRF回路部の低消費電力化を追求し、RFバックスキヤッタリング技術を用いたセンサネットワーク構成やレベルダイアグラムを検討するなどにより、大項目(1)の回路開発と並行して研究を進めた。原理確認のために発振器型センサ回路を利用した群知能シリコンプロトタイプによる無線センシング実験を行った。電源電圧1.5V、消費電力100μWでセンサ値を周波数情報として送信できることを実測により実証した。さらに、バッテリーレスセンサモジュールに関して、温度だけではなくpHといった他の環境情報をセンシングできるようにし、通信距離や電力効率・SNRが向上するように改良を進めた。エネルギーハーベスティング回路(無線給電回路)については、その性能に特に影響を及ぼす結合コイル部に関して、ある設計制約下において電力効率を最良にするための設計フローとモデル式を確立した。コイルの線幅、配線間距離、巻き数をパラメータとしてモデル式による解析結果と実測を比較し、モデル式の妥当性を確認した。セ



(a) カオス発振器の回路図. 振幅が周期的に振動する信号や、神経細胞のスパイクのような信号、ノイズのような信号が生成できている。[2]

(b) 180nm Si CMOSでのレイアウトと試作ボード。[2]

図3 群知能的なカオス信号生成の検討用回路

ンサ回路部と無線通信部に関しては、実測により、1Vの電源電圧で $24.5\mu\text{W}$ という非常に低い消費電力で動作することを確認し、バックスキップした信号の変調周波数から pH を読み取ることができた。したがって、群知能シリコンモジュールの要素である、無線通信回路技術、センサ回路技術、エネルギーハーベスティング回路技術を開発し、超小型自律分散電子機器の基本的なファンクションを実証できた。

これらの成果や大項目(1)で実施したカオス発振器の成果をもとに、磁界結合型のバッテリーレス結合発振器を開発し、群知能的な振る舞いをすることを実測において確認した。さらに、これらの同期状態を外部信号によって制御できたことから、センサ値などの何らかの事象で制御可能な外部信号により同期状態に影響を及ぼすことでネットワーク全体が機能するという本研究の目的とする仕組みの基礎を一部構築できた。

以上より、群知能センサネットワークの肝となる技術として集団同期現象を基盤としたシリコン CMOS 通信ハードウェアと機能発現のためのセンサネットワークシステム設計を行った。超低消費電力な無線通信回路やバッテリーレスでのセンシングに成功したばかりではなく、複数の発振器の結合、つまり集団同期によるカオス信号生成やセンシング・機能発現を実測により確認できた。したがって、本研究の目的は概ね達成できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ludovico Minati, Mattia Frasca, Natsue Yoshimura, Leonardo Ricci, Pawel Oswiecimka, Yasuharu Koike, Kazuya Masu, Hiroyuki Ito	4. 巻 7
2. 論文標題 Current-Starved Cross-Coupled CMOS Inverter Rings as Versatile Generators of Chaotic and Neural-Like Dynamics Over Multiple Frequency Decades	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 54638 - 54657
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2019.2912903	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 Daisuke Yamane, Toshifumi Konishi, Teruaki Safu, Hiroshi Toshiyoshi, Masato Sone, Kazuya Masu and Katsuyuki Machida	4. 巻 66
2. 論文標題 Evaluation and Modeling of Adhesion Layer in Shock-Protection Structure for MEMS Accelerometer	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Microelectronics Reliability	6. 最初と最後の頁 78, 84
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.microrel.2016.09.018	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 LUDOVICO MINATI, KORKUT KAN TOKGOZ, MATTIA FRASCA, YASUHARU KOIKE, JACOPO IANNACCI, NATSUE YOSHIMURA, KAZUYA MASU, AND HIROYUKI ITO	4. 巻 8
2. 論文標題 Distributed Sensing Via Inductively Coupled Single-Transistor Chaotic Oscillators: A New Approach and Its Experimental Proof-of-Concept	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 36536 - 36555
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2020.297613	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

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Hiroyuki Ito, Yosuke Ishikawa, Nobuhiro Yoda, Shiro Dosho, Noboru Ishihara, and Kazuya Masu
2. 発表標題 An Ultra-Low Power Wireless Sensor Node for Intraoral Measurement
3. 学会等名 The 2nd International Symposium on Biomedical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Motohiro Takayasu, Shiro Dosho, Hiroyuki Ito, Noboru Ishihara, Kazuya Masu
2. 発表標題 A High-Resolution Capacitive-Sensor Interface Based on a Relaxation Oscillator
3. 学会等名 2017 Thailand - Japan Microwave (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takuya Yamaguchi, Shiro Dosho, Noboru Ishihara, Hiroyuki Ito, Kazuya Masu, Hiroyuki Nakamoto
2. 発表標題 A topology exploration and an optimization of planar inverted "F" antenna (PIFA) with Generic Algorithm
3. 学会等名 2017 Thailand - Japan Microwave (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮内 楓, 田口 泰地, 石川 洋介, 伊藤 浩之, 伊藤 浩之, 益 一哉, 石原 昇
2. 発表標題 RFバックスキヤットリングによる低電力ワイヤレスセンサ端末モジュールの試作評価結果
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Daisuke Yamane, Toshifumi Konishi, Teruaki Safu, Hideaki Nakajima, Minami Teranishi, Chun-Yi Chen, Tso-Fu Mark Chang, Masato Sone, Hiroshi Toshiyoshi, Kazuya Masu, and Katsuyuki Machida
2. 発表標題 Young's modulus evaluation of electroplated Ti/Au structures for MEMS devices
3. 学会等名 International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kazuya Masu, Daisuke Yamane, Katsuyuki Machida, Masato Sone, Yoshihiro Miyake
2. 発表標題 Development of High Sensitivity CMOS-MEMS Inertia Sensor and its Application to Early-Stage Diagnosis of Parkinson's Disease
3. 学会等名 European Solid-State Device Research Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 古賀 達也, 市川 崇志, 田中 直登, 緒方 大樹, 大良 宏樹, 山根 大輔, 石原 昇, 伊藤 浩之, 曾根 正人, 町田 克之, 三宅 美博, 益一哉
2. 発表標題 微弱筋音計測に向けた高分解能 MEMS 慣性センサモジュールの検討
3. 学会等名 第11回集積化MEMSシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuya Koga, Takashi Ichikawa, Naoto Tanaka, Taiki Ogata, Hiroki Ora, Daisuke Yamane, Noboru Ishihara, Hiroyuki Ito, Masato Sone, Katsuyuki Machida, Yoshihiro Miyake, Kazuya Masu
2. 発表標題 High-Sensitivity Inertial Sensor Module to Measure Hidden Micro Muscular Sounds
3. 学会等名 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔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
連携研究者	石原 昇 (Ishihara Noboru) (20396641)	東京工業大学・科学技術創成研究院・特任教授 (12608)	

