

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 1日現在

機関番号：16101
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22500203
 研究課題名（和文） 結合カオス回路網の特性調査とその情報処理ネットワークへの応用に関する研究
 研究課題名（英文） Investigation of Characteristics of Coupled Chaotic Circuit Networks and their Applications to Information Processing Networks
 研究代表者
 西尾 芳文 (NISHIO YOSHIFUMI)
 徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授
 研究者番号：80253227

研究成果の概要（和文）：本研究では、多様な時空間パターンを発生する大規模な結合カオス回路網を構築し、回路実験・計算機による数値シミュレーション・理論解析を通して、大規模結合カオス回路網に発生する位相同期パターンの特性を明らかにするとともに、その複雑な振る舞いを有効に利用した情報処理ネットワークへの応用についての調査を行った。特に、結合の強さを回路間の距離に応じて変化させた回路網において、配置密度に応じてクラスタリング状態が変化することを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this study, coupled chaotic networks generating various spatio-temporal patterns are investigated by circuit experiments, computer simulations, and theoretical analysis. Applications of the characteristics of the observed complex phenomena to information processing networks are investigated. In particular, clustering states of chaotic circuits in the network, whose coupling strengths are changed according to the distances between the circuits, are clarified to depend on the assignment density of the circuits.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学 ・ 感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：非線形回路・カオス・複雑系・ニューラルネットワーク・時空カオス・カオス同期・カオス工学

1. 研究開始当初の背景

結合発振回路は、自然界の様々な現象を記述するモデルとして知られており、古くから数多くの研究がなされてきている。特に、二つの発振回路が結合した系に対しては、様々な結合形状をもつ系に発生する同期現象の安定性や発生条件などについて深く研究がなされている。一方、生体の様々な器官、特

に神経系が多数の発振回路を結合したネットワークで記述することができるだろうということは比較的古くから指摘されている。近年、脳における情報処理がニューロンに入力されるパルスの時空間パターンにより支配されていることを示唆する研究成果が多数発表されてきており、多様な時空間パターンを生成する回路モデルを提案し、発生する

現象を解析することは、より高度な情報処理ネットワークを構築するために重要であると考えられる。

一方、近年、カオス信号のもつ情報量の多さやカオス発生系の柔軟性に注目して、カオス現象を積極的に工学システムに利用しているという気運が高まっている。特に、大自由度系に発生する時空カオス現象は、生命の発生や遺伝子の進化、人間のもつ創造性のメカニズムなど、従来の理論では説明することが難しかった多くの自然現象と深い関わりをもつことが指摘されているだけでなく、工学的にもニューラルネットワークの最適解の探索や遺伝的アルゴリズムにおける遺伝子の操作への適用、さらには情報の自己生成と動的処理を同時に有する並列情報処理機構としての応用の可能性が示唆されており、そのメカニズムの解明はカオスの工学的利用に貢献する点が大いと考えられる。

従来、2つのカオス回路の結合系に関する研究は、多くの研究者が取り組んできているが、多数のカオス発生系の結合系にみられる非線形現象の研究は、簡単な離散的数学モデルに関する研究を除くと、近年始まったばかりであり、しかも解析手法が確立されていないため、電気回路などの連続時間実物理システムを多数結合したネットワークなどの研究はほとんどなされていない。また、近年、カオス同期やカオス制御の理論を工学的に利用した研究が世界的に注目を集めているが、それらを大規模なカオスネットワークへ応用し、情報処理ネットワークとして利用しようという研究はまだ行われていない。

2. 研究の目的

本研究では、多様な時空間パターンを発生する大規模な結合カオス回路網を構築し、回路実験・計算機による数値シミュレーション・理論解析を通して、大規模結合カオス回路網に発生する位同期パターンの詳細な特性調査を行い、さらに、その複雑な振る舞いを情報処理ネットワークへ応用することを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 対象とするカオス回路網の決定

まず、様々なカオス発生回路を数個程度結合した系を試作し、発生する複雑現象を調べ、どのような特徴をもつ回路がネットワークの構成要素として期待できるか調査する。次に、カオス回路を結合するネットワークの形状を決定する。結合のトポロジーと種類には膨大な組み合わせがあるが、これまでのカオス回路の結合系に関する研究で得た経験と知識を活かして、多様な時空間パターンを発生する結合カオス回路網を決定する。決定にあたっては、実際に小規模のネットワークを

試作し回路実験で現象を確認しながら行う。また、回路実験や計算機シミュレーションの容易さ、自然現象との対応なども考慮する。

(2) 位同期パターンの複雑現象の調査

数十から百個程度のカオス発生回路からなる結合カオス回路網を実際に作成し、回路実験を行う。初期値の与え方やパラメータを変化させ、位同期状態が形成するパターンの調査・分類を行う。特に、部分回路となるカオス回路の不安定性を増していくことにより、位同期状態が空間的・時間的にカオス的に変化するような現象が発生することが予想される。どのようなパラメータで、このような同期状態のカオス的な振る舞いが発生するかについて調査を行う。

(3) 位同期パターンの時空間・周波数特性の調査

マルコフチェーンによるモデリングなどを利用した統計的解析を行い、発生する位同期パターンの時空間特性を明らかにする。さらに、結合カオス回路網に発生する位同期パターンの複雑な振る舞いについて、周波数特性に焦点を当てて調査を行う。カオス信号は広帯域スペクトルをもつことが知られており、スペクトル拡散通信方式への応用も検討されている。ここでは、特に、局所的な位同期の空間的伝搬が、カオス信号の広帯域スペクトル特性の時間的揺らぎに与える影響などについて調査を行う。

(4) 情報信号入力に対する応答特性の調査

結合カオス回路網に情報信号を外部入力として印加したときの応答特性の調査を行う。特に、情報がネットワークをどのような形でどのように伝搬していくか、また、その影響がネットワーク全体の複雑現象にどのような影響を与えるかについて、ネットワークの規模やパラメータを変化させて調査を行う。まずは、簡単な2値のデジタル信号を印加した場合の応答の調査を行い、ネットワークの基本的な応答特性を調査する。その後、搬送波として、基本カオス回路の自然周波数に近い正弦波を使ったPSK信号の印加についての調査を行う。また、印加ノードの位置に対する現象の依存性についての調査を行い、ネットワーク同期が達成されるための条件などについても明らかにする。

(5) 結合カオス回路網の人工ニューラルネットワークへの応用

結合カオス回路網の人工ニューラルネットワークへの応用についての研究を行う。結合カオス回路網の時空間履歴特性を利用し、動画像の時空間特性を考慮したコーディングの最適化について、また、結合カオス回路

網の競合学習過程を利用し、ノイズを含む多量のデータから有効な情報のみを取り出すデータマイニングへの応用について調査を行う。

(6) 結合カオス回路網の通信ネットワークへの応用

結合カオス回路網の通信ネットワークへの応用についての研究を行う。デジタル情報信号のネットワーク配信やルーティング決定アルゴリズム、また、ネットワーク同期獲得手法の開発への応用について調査を行う。さらに、カオス回路のもつ不規則性を利用した秘匿通信ネットワークへの応用についても調査を行う。

4. 研究成果

(1) パラメータ変動を含むカオス発生数学モデルの結合系に見られる同期現象の解析

二個から十個程度の簡単なカオス発生数学モデルを結合したシステムにおいて、各構成要素に周期的なパラメータ変動を与えた時に見られるカオス同期とその自己スイッチング現象についての解析を行った。特に、三個の結合システムにおいて、自己スイッチング現象の平均滞在時間の結合強度に対する依存性、及び、自己スイッチングが発生する領域についての詳細な調査を行った。

(2) アフォーダブルニューラルネットワークのスケリング特性に関する研究

カオスあるいはランダムに結合荷重が変動するアフォーダブルニューラルネットワークは、ダイナミックに構造が変化する大規模複雑系とみなすことができる。本研究では、アフォーダブルニューラルネットワークに、大規模複雑系にしばしばみられるスケリング特性がみられることを確認し、さらに、その特性を有効に活用することで、ニューラルネットワークの性能の向上が図れる場合があることを示した。

(3) 回路シミュレータを利用した結合振動回路の安定性の解析アルゴリズムの開発

本研究で対象とする大規模な非線形回路ネットワークの周波数応答特性は、通常、多数のピークをもち、さらには、系の非線形性の強さによっては不安定領域を含むことがある。本研究では、フロケの定理を満たすサブサーキットを作成し、回路シミュレータで過渡解析を行うことにより、容易に同期状態の安定性を判定することができるアルゴリズムを開発した。

(4) パラメータ変動を含むカオス発生電子回路の結合系に見られる分岐現象の解析

回路に含まれる素子の値が周期的に変動するようなカオス発生電子回路を結合したシステム（図1）に発生する複雑な分岐現象の調査を行った（図2）。周期解の固有値を数値的に計算し、分岐条件を詳細に調べることにより、本回路モデルに発生する特有な分岐現象が、パラメータ変動を含む簡単な数学的離散写像モデルの結合系に発生する現象と深い関連があることを確認することができた。

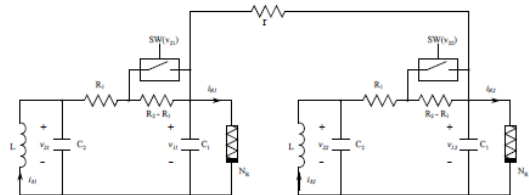


図1：パラメータ変動を含むカオス回路の結合系

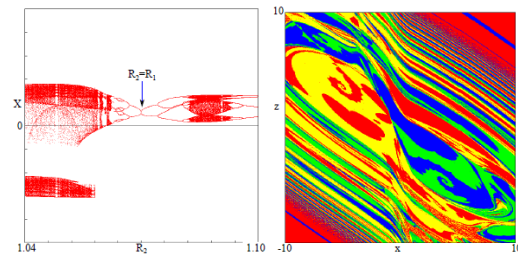


図2：1パラメータ分岐図とアトラクタの引力圏

(5) RCカオス発振回路の結合系に見られるカオス同期の解析

外部入力信号に対してカオス発振を示す回路を複数結合した系に見られる同期現象について、回路実験と計算機シミュレーションによる調査を行った。キャパシタで結合した場合（図3）、外部入力信号の位相状態に応じて、カオスの同相同期（図4）と逆相同期が見られる場合があることを確認することができた。さらに、外部入力信号の位相状態を動的に切り替えることで、カオス同期の状態がスイッチングする複雑な現象の発生も確認することができた。さらに、同回路を15段、一方向結合したネットワーク（図5）において、段数が進むにつれ、カオスの強さが大きくなることを確認し（図6(a))、また、隣接するカオス回路間の時間波形の相関特性を調査した（図6(b))。

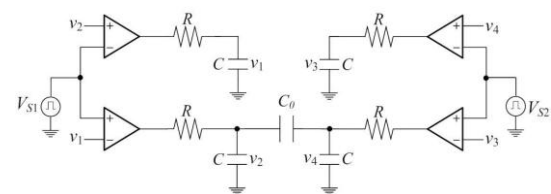


図3：キャパシタ結合RCカオス発振回路

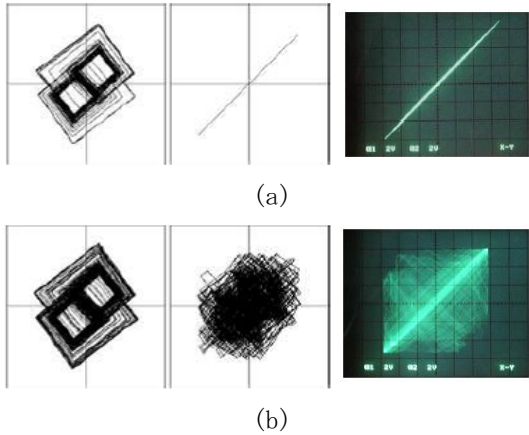


図4：カオスの同相同期

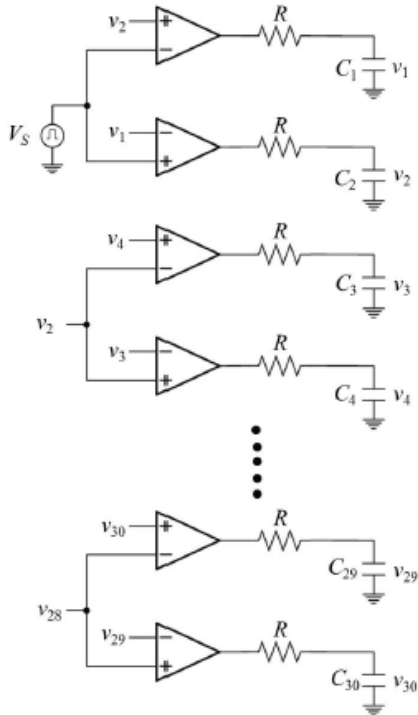


図5：RCカオス回路の15段結合ネットワーク

(6) 結合カオス回路網に見られるクラスタリング現象の調査

カオス回路（図7）を抵抗で完全結合したネットワークを対象とし、結合の強さを回路間の距離に応じて変化させると、配置される回路の密度に応じてカオス同期によって特徴付けられるクラスタリング現象が変化することを明らかにした。配置する回路の個数と位置を変化させながら数値実験を行い、クラスタリングの特性についての詳細な調査を行った。また、回路実験を行い、計算機シミュレーション結果の妥当性を確認することができた。図8に、7個のカオス回路を配置したネットワークの例を、図9と図10に、得られたクラスタリング現象の例を示す。

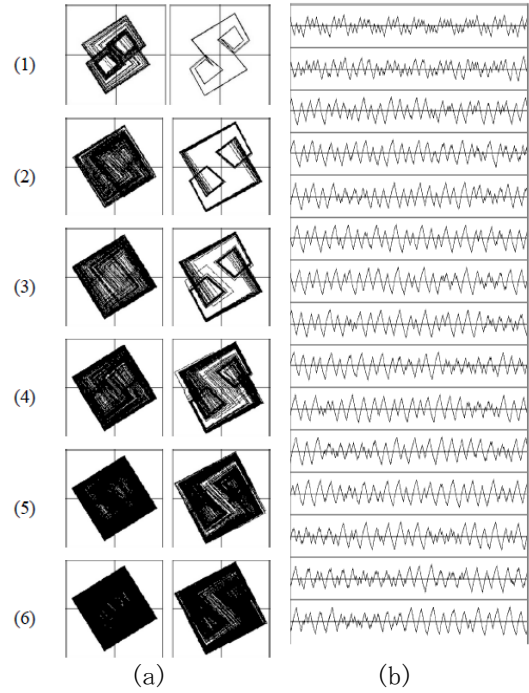


図6：カオス振動の調査

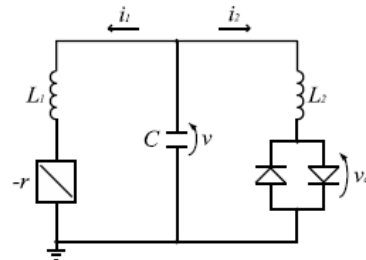


図7：カオス回路

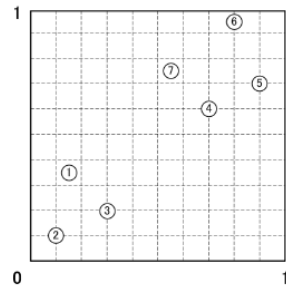


図8：カオス回路の配置例

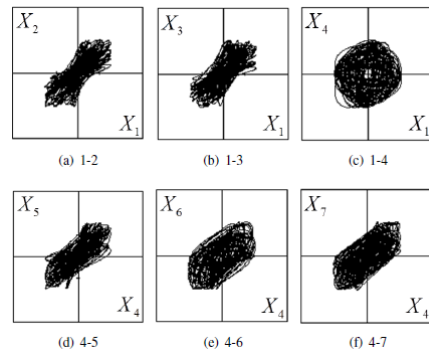


図9：数値実験結果

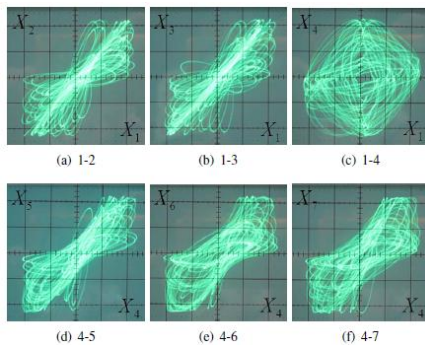


図 10 : 回路実験結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 17 件)

- ① Ayana SHIMADA, Yoko UWATE, Yoshifumi NISHIO and Jingmin XIN, "Synchronization Phenomena of Two Simple RC Chaotic Circuits Coupled by a Capacitor," Proc. RISP Int. Workshop on Nonlinear Circ., Comm. & Signal Processing, pp.129-132, Mar. 2013. (査読あり)
- ② Kentaro KAISHIMA, Takahiro NAGAI, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Synchronization Phenomena in Coupled van der Pol Oscillators with Nonlinearity Errors," Proc. RISP Int. Workshop on Nonlinear Circ., Comm. & Signal Processing, pp.137-140, Mar. 2013. (査読あり)
- ③ Yuji TAKAMARU, Yoko UWATE, Thomas OTT and Yoshifumi NISHIO, "Clustering Patterns Depending on Density of Chaotic Circuits in Networks," Proc. RISP Int. Workshop on Nonlinear Circ., Comm. & Signal Processing, pp.357-360, Mar. 2013. (査読あり)
- ④ Naoto KAGEYAMA, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Detailed Investigation of Synchronizations in Three Cross-Coupled Chaotic Circuits," Proc. RISP Int. Workshop on Nonlinear Circ., Comm. & Signal Processing, pp.628-631, Mar. 2013. (査読あり)
- ⑤ Takahiro NAGAI, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Investigation of Oscillatory Networks Including Two Types of Resistors," Proc. RISP Int. Workshop on Nonlinear Circ., Comm. & Signal Processing, pp.632-635, Mar. 2013. (査読あり)
- ⑥ Masaaki KOJIMA, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Double-Mode Oscillation in Chaotic Circuits Coupled by a Time-Varying Resistor," Proc. IEEE Asia Pacific Conf. on Circ. Syst., pp. 204-207, Dec. 2012. (査読あり)
DOI: 10.1109/APCCAS.2012.6419007
- ⑦ Yuji TAKAMARU, Yoko UWATE, Thomas OTT and Yoshifumi NISHIO, "Clustering Phenomena Considering the Density of Coupled Chaotic Circuits Networks," Proc. IEEE Asia Pacific Conf. on Circ. Syst., pp.647-650, Dec. 2012. (査読あり)
DOI: 10.1109/APCCAS.2012.6419118
- ⑧ Ayana SHIMADA, Yoko UWATE, Yoshifumi NISHIO and Jingmin XIN, "Analysis of Fifteen Coupled Chaotic Oscillators Composed of RC Circuits," Proc. Int. Sympo. on Nonlinear Theory & its Appl., pp.785-788, Oct. 2012. (査読あり)
- ⑨ Saori FUJIOKA, Yang YANG, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Propagation Waves in a Ladder of Coupled Simultaneous Oscillators," Proc. Int. Sympo. on Nonlinear Theory & its Appl., pp.907-910, Oct. 2012. (査読あり)
- ⑩ Chihiro IKUTA, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Multi-Layer Perceptron with Positive and Negative Pulse Glial Chain for Solving Two-Spirals Problem," Proc. Int. Joint Conf. on Neural Networks, pp.2590-2595, Jun. 2012. (査読あり)
DOI: 10.1109/IJCNN.2012.6252725
- ⑪ Yuji TAKAMARU, Hiroshige KATAOKA, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Clustering Phenomena in Complex Networks of Chaotic Circuits," Proc. IEEE Int. Sympo. on Circ. Syst., pp.914-917, May 2012. (査読あり)
DOI: 10.1109/ISCAS.2012.6272192
- ⑫ Hironori KUMENO, Daniele FOURNIER-PRUNARET and Yoshifumi NISHIO, "Coexistence Phenomenon Observed in Coupled Chua's Circuits Involving Parameter Varying," Proc. RISP Int. Workshop on Nonlinear Circ., Comm. & Signal Processing, pp.603-606, Mar. 2012. (査読あり)
- ⑬ Sho SHIMOMURA, Haruna MATSUSHITA and Yoshifumi NISHIO, "Ant Colony Optimization Using Genetic Information for TSP," Proc. Int. Sympo. on Nonlinear Theory & its Appl., pp.48-51, Sep. 2011. (査読あり)
- ⑭ Hiroshige KATAOKA, Yoko UWATE, Yoshihiro YAMAGAMI and Yoshifumi NISHIO, "Spice-Oriented Algorithm for Analysis of Coupled Oscillators," Proc. European

Conf. on Circuit Theory & Design, pp.758-761, Aug. 2011. (査読あり)
DOI: 10.1109/ECCTD.2011.6043648

- ⑮ Chihiro IKUTA, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Multi-Layer Perceptron with Glial Network Influenced by Local External Stimulus," Proc. RISP Int. Workshop on Nonlinear Circ., Comm. & Signal Processing, pp.199-202, Mar. 2011. (査読あり)
- ⑯ Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Synchronization in Coupled Maps with Asymmetric Network Property," Proc. Int. Sympo. on Nonlinear Theory & its Appl., pp.496-499, Sep. 2010. (査読あり)
- ⑰ Hironori KUMENO and Yoshifumi NISHIO, "Self-Switching Phenomenon of Synchronization in Three Coupled Parametrically Forced Logistic Maps," RISP Journal of Signal Processing, vol.14, no.4, pp.257-260, Jul. 2010. (査読あり)

[学会発表] (計7件)

- ① Naoto KAGEYAMA, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Synchronization Patterns in Three Cross-Coupled Chaotic Circuit," IEEE CASS Shanghai and Shikoku Chapters Joint Workshop on Nonlinear Circ. Syst., 2012.11.26, 上海交通大学 (中国) .
- ② Tomoya SHIMA, Yoko UWATE, Thomas OTT and Yoshifumi NISHIO, "Research of Synchronization for Social Network with Local Bridge by Coupled Rulkov Maps," IEEE Workshop on Nonlinear Signal Processing, 2012.9.25-27, 四国大学 (徳島市) .
- ③ Yoshifumi NISHIO, "Various Nonlinear Phenomena in Coupled Simultaneous Oscillators (招待講演)," Int. Summer Workshop on Nonlinear Dynamics & Statistical Mechanics of Complex Syst., 2012.8.24-29, CRPラヴィン(スイス).
- ④ Tomoya SHIMA, Chihiro IKUTA, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Image Recall from Partial Characteristic Using Partitioned Hopfield Neural Network," IEEE Workshop on Nonlinear Signal Processing, 2011.7.21, 四国大学 (徳島市) .
- ⑤ 生田智敬, 上手洋子, 西尾芳文, "グリアパルス連鎖をもつ多層パーセプトロンの研究," 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 2011.5.27, オリーブ記念館 (香川県) .
- ⑥ 片岡大茂, 上手洋子, 山上喜廣, 西尾芳

文, "SPICE を用いた平均化法による解析アルゴリズムの提案," 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 2011.5.27, オリーブ記念館 (香川県) .

- ⑦ Yoshifumi NISHIO and Yoko UWATE, "Scale-Free Property of Affordable Neural Network," Int. Sympo. on Nonlinear Theory and its Appl., 2010.9.7, クラクフ国際文化センター(ポーランド) .

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西尾 芳文 (NISHIO YOSHIFUMI)
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・教授
研究者番号：80253227

(2) 研究分担者

()
研究者番号：

(3) 連携研究者

()
研究者番号：

(4) 研究協力者

上手 洋子 (UWATE YOKO)
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・講師
小島 政明 (KOJIMA MASAOKI)
徳島大学・大学院先端技術科学教育部・博士
後期課程学生
生田 智敬 (IKUTA CHIHIRO)
徳島大学・大学院先端技術科学教育部・博士
後期課程学生
片岡 大茂 (KATAOKA HIROSHIGE)
ダイハツ工業株式会社・社員
下村 将 (SHIMOMURA SHO)
三菱電機エンジニアリング株式会社・社員
志摩 知哉 (SHIMA TOMOYA)
株式会社STNet・社員
島田 綾奈 (SHIMADA AYANA)
日垂化学工業株式会社・社員
高丸 裕司 (TAKAMARU YUJI)
株式会社NTTドコモ・社員
永井 隆博 (NAGAI TAKAHIRO)
YKK株式会社・社員
藤岡 沙織 (FUJIOKA SAORI)
徳島大学・大学院先端技術科学教育部・博士
前期課程学生