

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23300031

研究課題名(和文)大規模複雑システムとしてのナノ光電子系に学ぶ情報ネットワーク設計制御

研究課題名(英文) Design and Control of Information Networks Inspired by Nano-scale Electron Photon Interactions as Large-Scale Complex Systems

研究代表者

成瀬 誠 (Naruse, Makoto)

独立行政法人情報通信研究機構・光ネットワーク研究所フォトリックネットワークシステム研究室・主任研究員

研究者番号：20323529

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円、(間接経費) 4,320,000円

研究成果の概要(和文)：大規模複雑情報ネットワークシステムの設計・制御の理論基盤構築に向けて、大規模複雑システムとして現に機能しているナノ領域における光電子系の相互作用を、情報ネットワークの立場から分析し、そこで明らかになった性質を情報ネットワーク設計制御に展開する。具体的には、ナノ電子系におけるエネルギー消費性能分析、タイミング依存性、自律動作の分析などの情報システムとしての基本性能の解明を進め、その上で、ナノ電子系の性質に学んだ解探索及び意思決定機能の創造を示した。

研究成果の概要(英文)：Toward realizing the foundation of ultra-large-scale, complex information network systems, we obtain insights from the nano-scale electron photon interactions, which are indeed functioning in the real-world, via information-network-based viewpoints, and utilize such insights for the design and control of information network systems. We have successfully analyzed fundamentals performances of nano-scale electron photon interactions in terms of, for example, energy dissipation, skew dependence, autonomy, and robustness. Moreover, based on the above analysis, we have successfully demonstrated novel solutions searching and decision making functionalities.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：ネットワークアーキテクチャ

### 1. 研究開始当初の背景

情報ネットワークは社会基盤として益々高い信頼性が要求され、一方、環境性能の高いレベルでの実現も求められている。ところが、情報ネットワークの基礎理論は有線系ではパケット交換における待ち行列理論、無線系では電磁気学が未だその学理的基礎として扱われ、上記の重要課題との乖離が進んでいる。

### 2. 研究の目的

情報ネットワークシステムの大規模化は人間がシステム全体の詳細過程を完全に掌握し制御することが困難なレベルに達しており、システム全体が安定に機能し、かつ、環境調和性にも優れたシステム構造を見出すことが可能な、情報通信ネットワークの新たな学理的基礎の構築を目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究は、大規模複雑情報ネットワークシステムの設計・制御の理論基盤構築に向けて、大規模複雑システムとして現に機能しているナノ領域における光電子系の相互作用を、情報ネットワークの立場から分析し、そこで明らかになった性質を情報ネットワーク設計制御に展開するというアプローチを取る。

### 4. 研究成果

(1) ナノ電子系におけるエネルギー消費性能分析、タイミング依存性、自律動作の分析などの情報システムとしての基本性能の解明を進め、電子システムに対してエネルギー散逸が  $1/10000$  となり得ること(雑誌論文)。また相互作用ネットワーク故に自律性が生じることを確認した(雑誌論文)。なお、ここで分析したタイミング依存性は2入力1出力のANDゲートへの入力信号の到着タイミングのずれ(スキュー)に関する耐性であり、ネットワーク化された大規模システムの基礎となる内容である(雑誌論文)。このような性質は、パルスのタイミング依存性に基づいた可塑性(Spike-timing-dependent plasticity)を用いた信号処理が行われていると言われている脳の性質との類似性を示唆するものでもあり、情報システムとしての有効活用への発展可能性があると考えられる。

(2) 上記(1)の成果を基盤として、情報システムとしてのナノ電子系の性質の解明を進捗させた。

具体的には、単細胞生物である粘菌が示すダイナミクスとナノ光電子系のダイナミクスの類似性を見出し、ナノ微粒子間の近接場光相互作用、すなわちナノスケールのフォトニックネットワークを基盤とした新たな解探索概念の提唱並びにその理論的・数値的実証に世界に先駆けて成功した。より具体的には、量子ドット間の相互作用ネットワークを

介した光エネルギーの輸送パターンを外部からの制御光によるステートフィリング効果によって制御するというアーキテクチャを基礎としたシミュレーションにより実行可能性を評価した。量子ドット間の相互作用は共鳴エネルギー準位を介してネットワーク化されており、システム内の量子ドットの何れに対してもエネルギー散逸無しで到達し得るが、行き先となる量子ドットにおいて生じる散逸過程の生じやすさに依存して光エネルギーの輸送パターンは確率的に異なってくる。これを用いて解空間の探索を可能とし、制約充足問題の解決をシミュレーションにより確認した(雑誌論文)。さらにこの概念をNP完全性が証明されている充足可能性判定問題(SAT問題)に適用し、提案手法に基づいた問題解決を確認するとともに従来手法よりも短い反復回数で解を得ることを確認した(雑誌論文)。さらにこの概念を意思決定問題(多本腕バンディット問題)に適用し、問題の解決及び従来手法を凌ぐ適応性を有することを確認し、その成果はNature誌のオンライン雑誌に採択された(雑誌論文)。また、このようなネットワークを用いる解探索機能は、電子デバイスにおいても実現可能であることを確認した(雑誌論文)。このような一連の成果は世界的に注目を集め、招待論文(雑誌論文、)のほか各種メディアで報道された。

(3) 光伝搬の一般原理の一つであるホイヘンスの原理と情報ネットワークの共通点を分析し、ホイヘンスの原理と繰り込み変換に基づく自律分散的構造形成技術の提案を行った。(学会発表、)

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計13件)

M. Naruse, K. Akahane, N. Yamamoto, P. Holmström, L. Thylén, S. Huant, and M. Ohtsu: Analysis of optical near-field energy transfer by stochastic model unifying architectural dependencies, Journal of Applied Physics, Vol. 115, No. 15, pp. 154306 1-7, 2014(査読有)  
DOI: 10.1063/1.4871668

M. Naruse, M. Aono, and Song-Ju Kim: Nanoscale photonic network for solution searching and decision making problems, IEICE Transactions on Communications, Vol. E96-B, No. 11, pp. 2724-2732, 2013. (査読有, 招待論文)  
DOI: 10.1587/transcom.E96.B.2724

S. Kasai, M. Aono, and M. Naruse: Amoeba-inspired Computing Architecture Implemented using Charge Dynamics in Parallel Capacitance Network, Applied Physics Letters, Vol. 103, No. 13, pp. 163703 1-3, 2013. (査読有)

DOI: 10.1063/1.4826143

M. Naruse, N. Tate, Y. Ohyagi, M. Hoga, T. Matsumoto, H. Hori, A. Drezet, S. Huant, and M. Ohtsu: Optical near-field-mediated polarization asymmetry induced by two-layer nanostructures, *Optics Express*, Vol. 21, No. 19, pp. 21857-21870, 2013. (査読有)

DOI: 10.1364/OE.21.021857

S.-J. Kim, M. Naruse, M. Aono, M. Ohtsu, and M. Hara: Decision Maker based on Nanoscale Photo-excitation Transfer, *Scientific Reports*, Vol. 3, Article number 2370, 2013. (査読有)

DOI: 10.1038/srep02370

M. Aono, M. Naruse, S.-J. Kim, M. Wakabayashi, H. Hori, M. Ohtsu, and M. Hara: Amoeba-inspired Nanoarchitectonic Computing: Solving Intractable Computational Problems using Nanoscale Photoexcitation Transfer Dynamics, *Langmuir*, Vol. 29, No. 24, pp. 7557-7564, 2013. (査読有)

DOI: 10.1021/la400301p

M. Naruse, N. Tate, M. Aono, and M. Ohtsu: Information physics fundamentals of nanophotonics, *Reports on Progress in Physics*, Vol. 76, No. 5, pp. 056401 1-50, 2013. (査読有, 招待論文)

DOI: 10.1088/0034-4885/76/5/056401

M. Naruse, M. Aono, S.-J. Kim, T. Kawazoe, W. Nomura, H. Hori, M. Hara, and M. Ohtsu: Spatiotemporal dynamics in optical energy transfer on the nanoscale and its application to constraint satisfaction problems, *Physical Review B*, Vol. 86, No. 12, pp. 125407 1-10, 2012. (査読有)

DOI: 10.1103/PhysRevB.86.125407

M. Naruse, N. Tate, and M. Ohtsu: Optical security based on near-field processes at the nanoscale, *Journal of Optics*, Vol. 14, No. 9, pp. 094002 1-13, 2012. (査読有, 招待論文)

DOI: 10.1088/2040-8978/14/9/094002

M. Naruse, P. Holmström, T. Kawazoe, K. Akahane, N. Yamamoto, L. Thylén, and M. Ohtsu: Energy dissipation in energy transfer mediated by optical near-field interactions and their interfaces with optical far-fields, *Applied Physics Letters*, Vol. 100, No. 24, pp. 241102 1-4, 2012. (査読有)

DOI: 10.1063/1.4729003

M. Naruse, Y. Liu, W. Nomura, T. Yatsui, M. Aida, L. B. Kish, and M. Ohtsu: Stochastic processes in light-assisted nanoparticle formation, *Applied Physics Letters*, Vol. 100, No. 19, pp. 193106 1-5, 2012. (査読有)

DOI: 10.1063/1.4711808

M. Naruse, F. Peper, K. Akahane, N. Yamamoto, T. Kawazoe, N. Tate, and M. Ohtsu: Skew Dependence of Nanophotonic Devices based on Optical Near-Field Interactions, *ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems*, Vol. 8, No. 1, pp. 4:1-4:12, 2012. (査読有)

DOI: 10.1145/2093145.2093149

M. Naruse, K. Leibnitz, F. Peper, N. Tate, W. Nomura, T. Kawazoe, M. Murata, and M. Ohtsu: Autonomy in excitation transfer via optical near-field interactions and its implications for information networking, *Nano Communication Networks*, Vol. 2, No. 4, pp. 189-195, 2011. (査読有)

DOI: 10.1016/j.nancom.2011.07.002

[学会発表](計 7件)

高木健志、高野知佐、会田雅樹、成瀬 誠: ホイヘンスの原理に基づく自律分散構造形成技術における生成クラスタ数の制御技術、電子情報通信学会情報ネットワーク研究会 (IN)、信学技報 IEICE Technical Report IN2013-114, pp. 89-94 (2013.12.20 広島市立大学 広島県 広島市)

成瀬 誠: 近接場光の局在性・階層性の数理モデルと応用、シンポジウム「計算科学・数理物理とナノフォトニクス of 新たな融合の可能性」、第74回応用物理学学会秋季学術講演会、講演予稿集、p. 50 (招待講演) (2013.9.17 同志社大学 京都府 京田辺市)

K. Takagi, M. Aida, C. Takano, and M. Naruse: A proposal of new autonomous decentralized structure formation based on Huygens' principle and renormalization, *The Third International Conference on Advanced Collaborative Networks, Systems and Applications (COLLA 2013)*, pp. 75-80 (2013.7.23 Hotel Novotel Cap 3000, Nice, France)

成瀬 誠、豎 直也: ナノフォトニクスにおける協同現象の理解と応用(招待講演)、第60回応用物理学関係連合講演会、講演予稿集、p. 197(2013.3.27 神奈川工科大学 神奈川県 厚木市)

成瀬 誠、豎 直也、青野真土、ナノフォトニクスの学術の進展: 情報科学の視点から、応用物理学会分科会日本光学会、ナノオプティクス研究グループ、ナノフォトニクス創成20周年シンポジウム予稿集、予稿集、p. 8-9 (招待講演) (2012.12.4 東京大学 東京都 文京区)

高木健志、会田雅樹、高野知佐、成瀬 誠: Huygens の原理とくりこみ変換に基づく新しい自律分散的構造形成技術の提案、電子情報通信学会技術研究報告 (IEICE Technical Report) コミュニケーションクオリティ, Vol. CQ2012-2, pp. 7-12 (2012.4.19 官公労八重山会館 沖縄県 石垣市)

成瀬 誠、劉洋、野村航、八井崇、会田

雅樹、大津元一：近接場光過程援用のナノ微粒子形成の確率過程、第59回応用物理学関係連合講演会、講演予稿集、03-192 (2012.3.17 早稲田大学 東京都 新宿区)

〔図書〕(計 4 件)

M. Naruse ed.: Nanophotonic Information Physics, Springer, Berlin, 2014.

M. Naruse, N. Tate, M. Aono, and M. Ohtsu: Nanointelligence: Information Physics Fundamentals for Nanophotonics, in M. Naruse ed., Nanophotonic Information Physics (Springer, Berlin, 2014), pp. 1-39

N. Tate, M. Naruse, and M. Ohtsu, Engineering of a Nanometric Optical System Based on Optical Near-Field Interactions for Macro-Scale Applications in M. Naruse ed., Nanophotonic Information Physics (Springer, Berlin, 2014), pp. 161-182

M. Aono, S.-J. Kim, M. Naruse, M. Wakabayashi, H. Hori, M. Ohtsu, and M. Hara: A Nanophotonic Computing Paradigm: Problem-Solving and Decision-Making Systems Using Spatiotemporal Photoexcitation Transfer Dynamics, in M. Naruse ed., Nanophotonic Information Physics (Springer, Berlin, 2014), pp. 223-244

〔その他〕

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/makotonaruseweb/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

成瀬 誠 (NARUSE, Makoto)

(独)情報通信研究機構・光ネットワーク研究所フォトニックネットワークシステム研究室・主任研究員

研究者番号：20323529

### (2) 研究分担者

会田 雅樹 (AIDA, Masaki)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：60404935

村田 正幸 (MURATA, Masayuki)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：80200301

ペパー フェルディナンド (PEPER, Ferdinand)

(独)情報通信研究機構・脳情報通信融合研究センター脳情報通信融合研究室・研究マネージャー

研究者番号：40359097

和田 尚也 (WADA, Naoya)

(独)情報通信研究機構・光ネットワーク研究所フォトニックネットワークシステム研究室・室長

研究者番号：20358873

### (3) 連携研究者

堀 裕和 (HORI, Hirokazu)

山梨大学・医学工学総合研究部・教授

研究者番号：10165574

豎 直也 (TATE, Naoya)

東京大学・工学系研究科・特任研究員

研究者番号：30466784