

【令和2年度実績】

1. 研究力強化による世界的研究成果の創出

No.20 ①-2 世界トップレベル研究の推進

No.21 ①-3 国際的ネットワークの構築による国際共同研究等の推進

No.22 ②-1 経済・社会的課題に応える戦略的研究の推進

No.25 ③-1 新たな研究フロンティアの開拓

No.32 ②-3 附置研究所等の機能強化

実績報告

研究所内の研究交流会などを通じた情報交換と連携研究の推進、ならびに URA 教員による論文指標調査とその研究者へのフィードバックや大型外部資金申請のサポートなどにより、大型の外部資金獲得につなげ、これらの大型研究プロジェクトの推進により我が国の情報通信分野を牽引している。令和2年度は、基盤研究(S)(4件)、JST-CREST(5件)、JST-さきがけ(3件)、文部科学省・国家課題対応型研究開発推進事業(Q-LEAP)、総務省・電波資源拡大のための研究開発(2件)、Human Frontier Science Program など総額1億円を超えるプロジェクト7件を含む多数の大型プロジェクトを推進するなど、活発な研究推進が実現できている。

これらを通して、下に例を示すように世界的研究成果を生みだしている。

1-1 新規スピントロニクス素子の開発

スピントロニクス素子の持つ確率的な振る舞いを利用した新しいコンピュータの原理実証システムを構築して量子アニーリングマシンと等価な機能を実現し、古典コンピュータが苦手とする因数分解の実証に成功した。これに関連した成果は高IF論文誌に6件の論文として掲載され、そのうちの3編はTop1%論文(1-3)であり、またNHKニュースや日経産業新聞等多数の報道や、学会優秀研究賞や優秀若手研究者賞等多数の受賞、科研費特別推進研究やCRESTの受託にも繋がっている。

1) "Magnetization switching by spin-orbit torque in an antiferromagnet-ferromagnet bilayer system," Nature Materials 15, 535-541 (2016)

2) "Integer factorization using stochastic magnetic tunnel junctions", Nature 573, 390-393 (2019)

3) "Neuromorphic Spintronics", Nature Electronics, 3, 360-373 (2020).

1-2 次世代暗号を高性能かつ安全に実現するハードウェアの研究開発

現在世界で最も広く利用される国際標準暗号AESを対象として、従来比50%以上の省エネルギーを達成するハードウェアの設計方法論を確立した。これは将来のセキュア情報通信の基盤となる画期的成果であり、IEEE Trans. Computers 等のトップジャーナルに論文が採録された(=1,2)。

また、Phy.org 等の各種メディアでの報道のほか、基調講演・招待講演依頼 15 件、日本学術振興会賞、German Innovation Award 受賞などのほか、CREST の受託にもつながった。

- 1) “Diffusional Side-channel Leakage from Unrolled Lightweight Block Ciphers: A Case Study of Power Analysis on PRINCE,” IEEE Transactions on Information Forensics & Security, Vol.16, pp. 1351–1364, October 2020.
- 2) “High Throughput/Gate AES Hardware Architectures Based on Datapath Compression,” IEEE Transactions on Computers, Vol. 69, Issue 4, pp. 534–548, April 2020.

1-3 極微細磁気トンネル接合の開発

磁気抵抗ランダムアクセスメモリ(MRAM)の高機能化に不可欠な磁気トンネル接合素子の性能を維持しながらそのサイズを低減する技術を開発し、高性能化を実現した。2018 年に開発した形状磁気異方性磁気トンネル接合に、今回新たに静磁気結合を用いた多層強磁性構造を採用することで、世界最小となる 2.3 nm までの素子の動作を実証し、高い不揮発性や低電圧での書き換え特性などを達成した。本成果は新聞や多くのウェブ等でも取り上げられた。

- 1) "High-Performance Shape-Anisotropy Magnetic Tunnel Junctions down to 2.3 nm," IEEE International Electron Devices Meeting (2020)

1-4 単一チャネル超テラビット級大容量光伝送技術に関する研究

光ナイキストパルスはスペクトル広がりを抑えつつ超高速伝送を実現できる新たな光パルスとして考案した。本パルスを用いて単一チャネル 15 Tbit/s への超高速伝送、および単一チャネル 1 Tbit/s で 1000 km を超える長距離伝送に世界で初めて成功した。科研費特別推進研究の中心的成果であり、研究進捗評価において A+(当初目標を超える研究の進展があり、期待以上の成果が見込まれる)との高い評価を受けた。高 IF 電子ジャーナル速報誌 (IF: 3.561, h5-index: 99) に掲載され、IEEE の Journal (IF: 3.465, h5-index: 53)からは招待論文の要請を受けた。特許出願は期間中 6 件で、日経産業新聞、日刊工業新聞、河北新報にも取り上げられた。

- 1) “Ultrahigh-speed Nyquist pulse transmission beyond 10 Tbit/s,” IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics (invited paper), 27, 2, 7700612, (March/April 2021).

1-5 グラフェンの理論限界を超えるテラヘルツ電磁波の増幅に成功 ~ 次世代6G&7G超高速無線通信の実現に光明

炭素原子の単原子層材料であるグラフェンをチャネルとするトランジスタ素子を試作し、グラフェン内電子集団で形成される電荷振動量子:プラズモンを直流電流で励振することにより、グラフェンの電子がテラヘルツ波と直接相互作用して得られる理論限界を4倍も上回る巨大増幅作用を室温下で観測することに成功した。テラヘルツ波を利用する次世代超高速無線通信:6G、7G実現のブレークスルーとなる画期的な成果である。物理学分野において最高の IF(12.57 by WOS)を

誇るオープンアクセス学術論文誌として掲載され、国際会議招待講演依頼:5件、科学雑誌解説記事寄稿依頼:2件、科学セミナー講演依頼:1件などの反響もあった。

1) "Room temperature amplification of terahertz radiation by grating-gate graphene structures," Phys. Rev. X, 10, 3, pp. 031004-1-19, July 2020.

1-6 COVID-19流行と経済活動の相互作用に関する数理的研究

COVID-19の流行阻止のためには人と人との接触をできる限り少なくすることが必要であるが、その一方で自粛により膨大な経済損失が起きてしまうというジレンマを解消し、経済活動を維持しつつも流行を阻止するための方策を見出す問題を議論するため、経済活動の要因を取り込んだCOVID-19流行の数値モデルを提案した。IF2.749の論文誌に掲載された。オンラインで公開されてからわずか1週間でダウンロード数は130に達し、被引用数は半年の間に5件、オンライン公開からわずか1週間でTwitterで4件採り上げられた。

1) An agent-based model of the interrelation between the COVID-19 outbreak and economic activities, Proceedings of the Royal Society A, 477, (2020)

1-7 その他にも、次のような卓越した研究成果があった。

- 無線IoT用リアルタイムスペアナ
 - 1) A Filter Design Method of Direct RF Undersampling On-Board Receiver for Ka-Band HTS, IEICE Transactions on Communications, E103-B, 10, 1078-1085 (2020)
 - 2) Link Design and Received Power Measurement of 5 GHz Band Wi-Fi Backscatter System Using a Miniaturized Antenna Module, IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology, 226.228 (2020)
- 異種無線IoTシステムにおける空間再利用
 - 1) Evaluation of Channel Capacity of Millimeter-Wave Wireless Body Area Network in Overcrowded Train, IEICE Communication Express, 9, 9, 451-456 (2020)
- 量子制御可能な巨視的振り子を開発 – 量子振り子が生じる重力の検証やダークマター探索などへ応用可能
 - 1) High-Q Milligram-Scale Monolithic Pendulum for Quantum-Limited Gravity Measurements, Physical Review Letters, 124.221102 (2020)
- 脳波による空間的注意の計測
 - 1) Effect of auditory spatial attention in rear side, The Journal of the Acoustical Society of America (2020)
 - 2) Measuring attentional facilitation related to hand movement goal independently of the top-down attention, VISION (2020)
- 自走壁型プロップを用いた触覚提示および疑似力覚提示手法
 - 1) ZoomWalls: Dynamic Walls that Simulate Haptic Infrastructure for Room-scale VR World, Proc. of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST), 223-235 (2020)
 - 2) BouncyScreen: Physical Enhancement of Pseudo-Force Feedback, Proc. of IEEE

Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, 363-372 (March 2021)

- 我が国独自の容量顕微鏡技術である走査型非線形誘電率顕微鏡の原理から産業応用まで幅広く詳述した、研究者必読のスタンダード的な解説書を出版
1) Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy: Investigation of Ferroelectric, Dielectric, and Semiconductor Materials and Devices, Elsevier, ISBN 9780128172469 (2020).
- 窒化ガリウム FET における量子ドット形成
1) Formation of quantum dots in GaN/AlGaIn FETs, Scientific Reports, 10, 15421, 1-5 (2020)
- 半導体量子ビット、センサの高速電気測定手法の研究
1) Gate voltage dependence of noise distribution in radio-frequency reflectometry in gallium arsenide quantum dots, Applied Physics Express, 14, 3, 035002 (2021)
- コヒーレントナイキストパルス伝送技術の研究
1) Ultrahigh-speed Nyquist pulse transmission beyond 10 Tbit/s, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 27, 2 (March-April 2021)
- 量子雑音ストリーム暗号(QNSC)技術の研究
1) 10 Tbit/s QAM quantum noise stream cipher coherent transmission over 160 km, Journal of Lightwave Technology, 39, 4 (Feb 2021)

2. 新しい産学連携研究の推進

No.22 ②-1 経済・社会的課題に応える戦略的研究の推進

No.34 ①-1 世界標準の産学連携マネジメントの推進

No.35 ②-1 社会連携活動の全学的推進

実績報告

本研究所は社会還元性の高い研究成果を多数有しており、それをもとにして従来の枠組みにとらわれない新しい産学連携を推進している。その代表例を下に示す。

2-1 異分野業種企業と連携した共同研究「新しい論理に基づく逆問題解法ハードウェアに関する基礎研究」

医療とコンピューティングという従来にない新しい組み合わせによる産学共同研究を推進している。本研究所には消費電力が従来の 100 分の 1 以下となる超低消費電力高性能マイコンなど、コンピューティングに関する世界的成果 1) を有しておりその医療分野への貢献が期待される。すでに医療機器メーカーと大規模な産学共同研究を開始しており、成果をトップジャーナル誌に発表している 1-2)。

1) "A Design Framework for Invertible Logic," IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2020. DOI 10.1109/TCAD.2020.3003906. (IF=2.402)

2) "High-Throughput/Low-Energy MTJ-Based True Random Number Generator Using a Multi-Voltage/Current Converter," IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, Vol. 28, Issue 10, pp. 2171-2181, Oct. 2020. DOI: 10.1109/TVLSI.2020.3005413. (IF=2.037)

2-2 利用環境・用途を意識した情報セキュリティ基盤技術の研究

物理複製困難関数 (PUF) と呼ばれるハードウェア認証技術において世界最軽量の新方式を確立した。ハードウェアセキュリティに関する最も主要な国際学術誌 (Google Scholar h5-index: 36, Computer Hardware Design 部門第 13 位, Computer Security & Cryptography 部門第 13 位) に掲載された (2020.8)。日本経済新聞や日刊工業新聞, EE Times をはじめとする 10 社以上のメディアに取り上げられた。本研究に関連して, 内閣府サイバーセキュリティ戦略本部 研究開発戦略専門調査会 研究・産学官連携戦略 WG 委員 (2020.7-) として, 我が国の次世代サイバーセキュリティ戦略策定に向けた提言に寄与した。また, 連携企業と共同で国内外 2 件の特許出願を行った (国際出願)。また, PUF によるハードウェア認証技術に関して関連する国内ワークショップにて招待講演を行い, 技術の普及・啓発を推進した。

1) Rejection Sampling Schemes for Extracting Uniform Distribution from Biased PUFs, IACR Transactions on Cryptographic Hardware and Embedded Systems, Vol. 2020, Issue 4, pp. 86-128 (2020)

2) PMAC++: Incremental MAC Scheme Adaptable to Lightweight Block Ciphers, IEEE International Symposium on Circuits and Systems (2020)

2-3 新しい知財の扱いによる共同研究

東北大学オープンイノベーション戦略機構と連携して、知財の新しい取り扱いを含む新しいスキームを取り入れたピクシーダストテクノロジーとの産学共同研究に参画している。この共同研究では実施する 2 件の研究テーマのいずれも本研究所が担当している。音情報、超音波振動検知を基盤技術とした空間情報化技術の開発である。

2-4 通研単独出願特許による知的財産権等収入

創発の考え方によるアルゴリズムを利用したコンテンツの動的・インタラクティブ表示手法に関する特許 (特許第 5574438 号) は本研究所単独で出願した。そして当該技術を活用する共同研究や技術指導を国内外の大学や企業など 9 組織と進めてきた。令和 2 年度のこの技術に関する知的財産権等収入 (大学への入金額) は 6 件で 1,038 千円であった。これを含めた本研究所の令和 2 年度の知的財産権等収入の計は 3,480 千円と、対前年度 2.5 倍に増加した。

3. 研究者コミュニティを牽引する拠点活動の推進

No.20 ①-2 世界トップレベル研究の推進

No.21 ①-3 国際的ネットワークの構築による国際共同研究等の推進

No.33 ②-4 国際共同利用・共同研究拠点及び共同利用・共同研究拠点の機能強化

実績報告

情報通信に関する研究拠点として共同プロジェクト研究を推進し国内外の研究者コミュニティを牽引し多くの成果を挙げている。令和2年度は125件(組織間連携プロジェクト区分S、およびその国際版の計2件を含む)、約1,200人の参加者で研究を推進し、情報通信分野の研究者コミュニティに貢献した。その代表的成果を下に示す。

3-1 グラフェンテラヘルツレーザーの創出に関する研究

国際共同研究を含む複数の共同プロジェクト研究ならびに科研費特別推進研究、科研費基盤研究(S)等の研究を通して、独自構造による新原理グラフェンチャネルレーザートランジスタ素子を試作し、100Kの動作温度において電流注入励起による世界初の単一モードレーザー発振¹⁾、さらに、室温下でも理論限界を4倍超越する誘導増幅利得の実証に成功した²⁾。関連論文89編の総被引用数は令和3年1月までに3,266回、本成果に関連する国際会議招待講演は82件に上る。2019年度文部科学大臣表彰科学技術賞(研究分野)受賞など高く評価されている。

1) "Terahertz light-emitting graphene-channel transistor toward single-mode lasing," *Nanophotonics*, vol. 7, iss. 4, pp. 741-752, Apr. 2018. (IF=7.49)

2) "Room temperature amplification of terahertz radiation by grating-gate graphene structures," *Physical Review X*, vol. 10, iss. 3, pp. 031004-1-19, July 2020. (IF=12.58)

3-2 光を用いた薄膜磁石の極性を制御する新手法の開発

レーザーパルスと強磁性磁化と電子スピンの相互作用に関する詳細な理解に基づいて、30フェムト秒のレーザーパルスでの薄膜磁石の極性を反転できる新手法を開発した。30フェムト秒のレーザーパルスでの薄膜磁石の極性の反転が可能であり、従来技術(磁界による反転: 3ナノ秒程度)と比べて10万倍高速である。2つの論文が *Advanced Science* 誌(IF=15.84)と *Nano Letters* 誌(IF=11.238)に掲載され、多数のWebメディアで取り上げられた。

1) "Engineering Single-Shot All-Optical Switching of Ferromagnetic Materials," *Nano Letters* 20, 8654 (2020).

2) "Energy Efficient Control of Ultrafast Spin Current to Induce Single Femtosecond Pulse Switching of a Ferromagnet," *Advanced Science* 7 (2020).

3-3 ブレインモルフィックコンピューティングハードウェアの基盤研究

物理化学系の総体的な「プロセス」として、脳に特異的に発現する情報処理様式をハードウェア実現するパラダイムを提案した。特に、スピントロニクスデバイスの特性・ダイナミクスを直接活用するニューロンやシナプス素子の数理・回路モデルを提案した。脳型非ノイマン型の計算ハードウェアパラダイムの一つとして高く評価され、3件の招待講演の他、編集委員会からの依頼の解説論文がある。東京エレクトロンと知の館との連携、日本神経回路学会全国大会の特別セッションと基調講演、さらに科研費基盤(A)採択に繋がっている。

- 1) The 2nd International Symposium in Neuromorphic AI Hardware, Online, December 7 (2020) (招待講演) 等

3-4 フルコヒーレント光無線融合伝送技術に関する研究

増加の一途をたどる情報トラフィックを経済的に収容するための社会インフラの実現に資する研究で、モバイルフロントホール回線の大容量化・長延化に資する技術であり、将来の光と無線をシームレスに統合した新たな伝送システムの実現に有益な知見を与え、光・無線統合信号処理技術や光・無線融合デバイス等の創出に繋がる。ヨーロッパ最大の光通信国際会議(採択率:約30%、h-index: 45)に3年連続で採択されるとともに、無線通信分野における国内外の学会・研究会において招待講演を行った。特許を2件出願し、うち1件は国際出願。総務省の「第5世代移動通信システムの更なる高度化に向けた研究開発」で継続して推進。日本学術会議が策定する第23期学術の大型研究計画に関するマスタープラン(マスタープラン2020)においても、電気電子工学分野における学術大型研究計画として認定されている。

- 1) “64 Gbit/s, 256 QAM coherently-linked optical and wireless transmission in 61 GHz band using novel injection-locked carrier frequency converter,” ECOC 2020, Th1G-7, Dec. (2020).

3-5 バーチャル音空間の高精度合成技術とその評価法の確立

3次元音空間の高精度收音再生技術の高度化は次世代マルチメディア技術の重要な基盤技術の一つである。本研究は人間の多感覚音空間知覚を活用した高度な3次元音空間合成技術を実現すると共に、その評価技術の確立を目指す。独、米、豪の有力大学・研究者と連携した工学、心理の分野にまたがる学際的な研究で、これまでも日本音響学会佐藤論文賞を受賞するなど成果を上げてきた。本国際学会発表と関連する研究発表が2020年に発行されたジャーナルの特集記事で紹介されるなど注目されている。

- 1) Comparing training effects associated with two sets of HRTF data on auditory localization performance, Proc. AES 148th Convention, 10379 (2020).

3-6 システムセキュリティ設計・解析技術の研究

秘匿通信や認証といった情報セキュリティ機能を有する情報通信システムを高性能かつ安全に設計するため、システム実装上の問題から物理的に生じる脆弱性(実装脆弱性)に関する研究を国際共同研究により推進し、低遅延暗号システムおよび AI システムにおける新たな実装脆弱性を発見するとともにその対策技術を明らかにした。情報セキュリティ技術に関するトップジャーナル(h5-index: 86, Google Scholar で部門第 1 位)に掲載され、当該分野最大の国際会議(h5-index:33)で招待講演を行った。

1) Diffusional Side-channel Leakage from Unrolled Lightweight Block Ciphers: A Case Study of Power Analysis on PRINCE, IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 16, pp. 1351-1364 (2020)

3-7 その他、次のような優れた研究成果があった。

- フルコヒーレント光無線融合伝送技術に関する研究
 - 1) 64 Gbit/s, 256 QAM coherently-linked optical and wireless transmission in 61 GHz band using novel injection-locked carrier frequency converter, ECOC, Th1G-7 (Dec. 2020)
- 反強磁性ヘテロ構造の電流操作
 - 1) Spin-orbit torque switching of an antiferromagnetic metallic heterostructure, Nature Communications 11, 5715 (2020)
- 超 100GHz 帯 CMOS 回路
 - 1) Gain Improvement of a 130 GHz CMOS Amplifier by Using Radial Stub as AC Ground, 2020 Asia-Pacific Microwave Conference (Dec. 2020)
- 黒色ヒ素燐とグラフェンのファンデルワールスヘテロ積層構造を利得媒質とするダイアゴナルキャリア注入型・テラヘルツ帯新奇光源・増幅・検出デバイスの創出
 - 1) Far-infrared and terahertz emitting diodes based on graphene/black-P and graphene/MoS₂ heterostructures, Opt. Exp., 28, 16, 24136-1-16 (July 2020)
 - 2) Multiple heterostructures with van der Waals barrier layers for terahertz superluminescent and laser diodes with lateral/vertical current injection, Semicond. Sci. Technol., 35, 085023-1-9 (July 2020)
- 人やモノの動きを連続して滑らかに、しかも正確に計ることが可能な 3 次元モーションキャプチャ技術
 - 1) Reconstruction of Dexterous 3D Motion Data from a Flexible Magnetic Sensor with Deep Learning and Structure-Aware Filtering, IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics (October 2020)
 - 2) IM6D: Magnetic Tracking System with 6-DOF Passive Markers for Dexterous 3D Interaction and Motion, ACM Transactions on Graphics, 34, 6 217:1-217:10 (November 2015)
- 次世代暗号コンピューティングの研究
 - 1) High Throughput/Gate AES Hardware Architectures Based on Datapath Compression, IEEE Transactions on Computers, 69, 4 (2020)
 - 2) Unified Hardware for High-Throughput AES-Based Authenticated Encryptions, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 67, 9 (Sept. 2020)

- カオスニューラルネットワークリザーバ集積回路と応用
 - 1) Switched-capacitor circuit implementation of the chaotic neural network reservoir, *Journal of Signal Processing*, 24, 4, 133-136 (2020)
 - 2) Cyclic reservoir neural network circuit for 3D IC implementation, in *Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications*, 81-84 (2020)
- スピントロニクス人工ニューロン素子の超省エネ制御手法の開発
 - 1) Giant voltage-controlled modulation of spin Hall nano-oscillator damping," *Nature Communications* 11, 4006 (2020)
- CMOS インバーティブルロジックに基づく脳型コンピューティング基盤技術の開発
 - 1) In-Hardware Training Chip Based on CMOS Invertible Logic for Machine Learning, *IEEE Trans. on Circuits and Syst. I Reg. Papers*, 67, 5, 1541-1550 (May 2020)
 - 2) Training Hardware for Binarized Convolutional Neural Network Based on CMOS Invertible Logic, *IEEE Access*, 8, 188004 - 188014 (Oct. 2020)
 - 3) A Design Framework for Invertible Logic, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2021(in press).