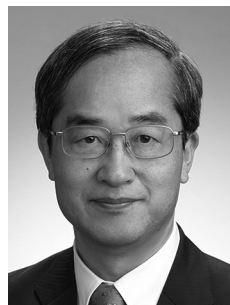


日本学士院賞 受賞者 荒川泰彦



略歴	生年	専攻学科学目
昭和五〇年三月	昭和二七年十一月	光電子工学
同 五五年三月		
同 五五年三月		
同 五五年四月		
同 五六年五月		
同 五九年二月		
同 六三年四月		
平成 五年八月		
同 一〇年七月		
同 一九年四月		
同 二四年一〇月		
東京大学工学部電子工学科卒業		
東京大学大学院工学系研究科博士課程修了		
工学博士		
東京大学生産技術研究所講師		
東京大学生産技術研究所助教授		
米国カリフォルニア工科大学客員研究員（昭和六一年一月まで）		
東京大学先端科学技術研究センター助教授		
東京大学先端科学技術研究所教授（現在に至る）		
東京大学先端科学技術研究センター教授（平成二二年三月まで）		
東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構長（現在に至る）		
東京大学生産技術研究所光電子融合研究センター長（現在に至る）		

工学博士荒川泰彦氏の「量子ドットと その光素子応用に関する研究」に対する 授賞審査要旨

電子の量子力学的波長である一〇ナノメートル程度の厚さの半導体薄膜を用いた電子の運動制御の研究は、一九六九年の江崎玲於奈博士による超格子・量子井戸の提案から始まった。この研究は、二次元電子系の物理の進展とともに、量子井戸レーザーなど新規素子をもたらし、IT社会の発展に大きく貢献した。

量子ドットは、超格子・量子井戸の新たな展開として一九八二年に荒川泰彦氏らが提案した究極の半導体ナノ構造である。荒川氏は、この提案の発表以降、量子ドットとその光素子応用の研究を一貫して進め、先駆的かつ卓越した研究業績を挙げってきた。同氏の業績は、量子ドットレーザーの黎明期研究、量子ドットレーザーの実現と実用化研究、単一量子ドット光素子研究、量子ナノ構造光物性研究の四つに大別できる。以下、それぞれについて説明する。

量子ドットレーザーの黎明期研究

一九八二年、荒川氏は榊裕之博士と共同で、電子の三次元量子閉じ込めによりその運動の自由度をゼロにする量子ドットの概念、およびそのレーザーへの応用を提案した。同時に、理論計算により、量子ドットレーザーにおける閾値電流の温度依存性の低減を予測した。さらに、同氏は、一九八四年カリフォルニア工科大学において、量子井戸レーザーや量子ドットレーザーの理論研究をさらに進め、閾値電流のみならず、変調帯域幅や量子雑音など、他の特性も大幅に向上することを示した。また、同氏らは、強磁場内に量子井戸もしくはバルク半導体レーザーを置き、電子の多次元量子閉じ込め効果を実現することにより、上記諸特性の向上可能性を実験的にも検証した。

同氏の一連の業績は、電子の運動自由度の次元の低減が、半導体レーザーの諸特性の向上に本質的に有効であることを示したものであり、きわめて先駆的である。

量子ドットレーザーの実現と実用化研究

荒川氏は、上記の黎明期研究に立脚し、量子ドットレーザーの実現と実用化の研究を開始した。まず、提案当時は自身も実現困難と考えた量子ドットの結晶成長に着手し、一九九四年には、有機金属

気相成長法としては初めてヒ化インジウム系量子ドットの自己形成成長に成功した。しかし、高性能量子ドットレーザーの実現には、均一・高密度の量子ドット形成が必要であり、その実現は困難を極めた。

同氏は、富士通研究所と共同で、高品質量子ドットの作製技術の確立を図り、二〇〇四年には温度無依存で高速変調可能な量子ドットレーザーの実現に成功した。この成果に基づき二〇〇六年にベンチャー企業が発足し、二〇一〇年には量産が開始され、二〇一五年度までに三〇〇万台以上の量子ドットレーザーが市場に出荷された。さらに、同氏は、FIRSTプログラムの中心研究者として、二〇一四年に量子ドットレーザーとシリコン電子・光集積回路の融合にも成功し、量子ドットレーザーの可能性をさらに大きく切り拓いた。

同氏の成果は、エネルギー単位の完全離散化という量子力学の本質を実用素子において初めて具現化したものであり、学術上、意義深い業績である。

単一量子ドット光素子研究

荒川氏の研究は、多数個の量子ドットを活性層としたレーザーへの展開にとどまるものではない。同氏は、単一の量子ドットを用いた光素子の重要性にも早くから着目し、顕著な成果を挙げた。まず、

量子情報通信や量子計算において必須の素子である単一光子発生素子について、二〇〇四年に産業界と共同で、光ファイバー通信波長帯で動作する素子を実現するとともに、二〇一四年には単一光子型量子暗号通信として世界最長の伝送距離を達成した。しかし、単一光子発生素子の動作温度が極低温に限定されることが、長年の課題であった。同氏は、窒化ガリウム量子ドットの結晶成長技術と物性物理の探求を一九九〇年代末から開始し、励起子分子の束縛エネルギーを制御することにより、二〇一五年に世界最高動作温度である三五〇Kにおける単一光子の発生に成功した。なお、同氏は、二〇一〇年に単一量子ドットレーザーを実現するなど、極限ナノレーザー研究においても卓越した業績を挙げている。

量子ナノ構造光物性研究

荒川氏は、量子ナノ構造の光物性研究においても、重要な成果を数多く達成した。例えば、一九九八年には、ヒ化インジウム量子ドットにおいて、離散準位に起因する状態密度のみならず連続的状态も存在することを、単一量子ドット分光により明らかにした。また、原子光学分野における電子と光共振器内の単一光子との間の強い量子的結合（真空ラビ振動）が固体中においても存在することを、量子井戸を含む垂直微小共振器において一九九三年に初めて示し

た。この成果を公表した論文は、現在、半導体共振器量子電気力学研究の原典となっている。

さらに、同氏の量子ナノ構造の物性に対する深い理解は、量子ドット太陽電池の研究にも展開された。同氏は、新たな量子準位の導入により、その変換効率の理論限界が七五%を超えることを二〇一一年に示し、当時の社会の注目を集めた。

以上、荒川泰彦氏は、量子ドットレーザ研究について、その研究の創始から実用化まで世界をリードするとともに、単一光子発生素子や量子ナノ構造光物性の研究において卓越した成果を達成し、「量子ドット科学技術」の発展に大きく貢献した。同氏は、上記の業績により、江崎玲於奈賞、藤原賞、内閣総理大臣賞・産学官連携功労者、紫綬褒章、C&C賞、IEEE David Sarnoff賞、Heinrich Welker賞、Nick Holonyak, Jr. 賞をはじめとして、多数の賞を受賞している。

主な論文の目録

【1】量子ドットレーザの黎明期研究

- 1-1 Y. Arakawa and H. Sakaki, "Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current", Appl. Phys. Lett. **40**, 939 (1982)
- 1-2 Y. Arakawa, H. Sakaki, M. Nishioka, H. Okamoto and N. Miura, "Spontaneous

emission characteristics of quantum well lasers in strong magnetic fields—An approach to quantum-well-box light source—", Jpn. J. Appl. Phys. **22**, L804 (1983)

- 1-3 Y. Arakawa, K. Vahala and A. Yariv, "Quantum noise and dynamics in quantum well and quantum wire lasers", Appl. Phys. Lett. **45**, 950 (1984)
- 1-4 Y. Arakawa, K. Vahala, A. Yariv and K. Lau, "Enhanced modulation bandwidth of GaAlAs double heterostructure lasers in high magnetic fields: Dynamic response with quantum wire effects", Appl. Phys. Lett. **47**, 1142 (1985)
- 1-5 Y. Arakawa and A. Yariv, "Quantum well lasers—Gain, spectra, dynamics", IEEE J. of Quantum Electron. **22**, 1887 (1986)

【2】量子ドットレーザの実現と実用化研究 (量子ドット等の結晶成長研究)

- 2-1 Y. Nagamune, M. Nishioka, S. Tsukamoto and Y. Arakawa, "GaAs quantum dots with lateral dimension of 25 nm fabricated by selective metalorganic chemical vapor deposition growth", Appl. Phys. Lett. **64**, 2495 (1994)
- 2-2 J. Oshinowo, M. Nishioka, S. Ishida and Y. Arakawa, "Highly uniform InGaAs/GaAs quantum dots (~15 nm) by metalorganic chemical vapor deposition", Appl. Phys. Lett. **65**, 1421 (1994)
- 2-3 Y. Arakawa, "Fabrication of quantum wires and dots by MOCVD selective growth", Solid-State Electron. **37**, 523 (1994)
- 2-4 J. Tatebayashi, M. Nishioka and Y. Arakawa, "Over 1.5 μ m light emission from InAs quantum dots embedded in InGaAs strain-reducing layer grown by metalorganic chemical vapor deposition", Appl. Phys. Lett. **78**, 3469 (2001)
- 2-5 M. Miyamura, K. Tachibana and Y. Arakawa, "High-density and size-controlled GaN self-assembled quantum dots grown by metalorganic chemical vapor deposition", Appl. Phys. Lett. **80**, 3937 (2002)
- 2-6 Y. Arakawa and S. Kako, "Advances in growth and optical properties of GaN-

based quantum dots", Phys. Stat. Sol. (a) **203**, 3512 (2006)

(量子ドットレーザーの実現と集積化研究)

- 2-7 K. Otsubo, N. Hatori, M. Ishida, S. Okumura, T. Akiyama, Y. Nakata, H. Ebe, M. Sugawara and Y. Arakawa, "Temperature-insensitive eye-opening under 10-Gb/s modulation of 1.3- μ m p-doped quantum-dot lasers without current adjustments", Jpn. J. Appl. Phys. **43**, L1124 (2004)

- 2-8 Y. Umino, N. Hatori, T. Akagawa, T. Shimizu, M. Okano, M. Ishizaka, T. Yamamoto, H. Okayama, Y. Onawa, H. Takahashi, D. Shimura, H. Yaegashi, H. Nishi, H. Fukuda, K. Yamada, M. Miura, J. Fujikata, S. Akiyama, T. Baba, T. Usuki, Y. Noguchi, M. Noguchi, M. Imai, N. Hirayama, S. Saitou, M. Yamagishi, M. Takahashi, E. Saito, D. Okamoto, M. Mori, T. Horikawa, T. Nakamura and Y. Arakawa, "Athermal silicon optical interposers with quantum dot lasers operating from 25 to 125 $^{\circ}$ C", Electron. Lett. **50**, 1377 (2014)

[c] 量子ドット集積化研究
(量子ドットレーザーの集積)

- 3-1 K. Takemoto, Y. Sakuma, S. Hirose, T. Usuki, N. Yokoyama, T. Miyazawa, M. Takatsu and Y. Arakawa, "Non-classical photon emission from a single InAs/InP quantum dot in the 1.3- μ m optical-fiber band", Jpn. J. Appl. Phys. **43**, L993 (2004)
- 3-2 T. Miyazawa, K. Takemoto, Y. Sakuma, S. Hirose, T. Usuki, N. Yokoyama, M. Takatsu and Y. Arakawa, "Single-photon generation in the 1.55- μ m optical-fiber band from an InAs/InP quantum dot", Jpn. J. Appl. Phys. **44**, L620 (2005)
- 3-3 S. Kako, C. Santori, K. Hoshino, S. Götzinger, Y. Yamamoto and Y. Arakawa, "A gallium nitride single-photon source operating at 200 K", Nat. Mater. **5**, 887 (2006)

- 3-4 M. J. Holmes, K. Choi, S. Kako, M. Arita and Y. Arakawa, "Room-temperature triggered single photon emission from a III-Nitride site-controlled nanowire quantum dot", Nano Lett. **14**, 982 (2014)

- 3-5 K. Takemoto, Y. Nambu, T. Miyazawa, Y. Sakuma, T. Yamamoto, S. Yorozu and Y. Arakawa, "Quantum key distribution over 120 km using ultrahigh purity single-photon source and superconducting single-photon detectors", Sci. Rep. **5**, 14383 (2015)

(量子ドットレーザー・ナノレーザーの研究)

- 3-6 M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Ota and Y. Arakawa, "Laser oscillation in a strongly coupled single-quantum-dot-nanocavity system", Nat. Phys. **6**, 279 (2010)
- 3-7 A. Tandaecharurat, S. Ishida, D. Guimard, M. Nomura, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Lasing oscillation in a three-dimensional photonic crystal nanocavity with a complete bandgap", Nat. Photonics **5**, 91 (2011)
- 3-8 Y. Ota, S. Iwamoto, N. Kumagai and Y. Arakawa, "Spontaneous two-photon emission from a single quantum dot", Phys. Rev. Lett. **107**, 233602 (2011)
- 3-9 J. Tatebayashi, S. Kako, J. Ho, Y. Ota, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Room-temperature lasing in a single nanowire with quantum dots", Nat. Photonics **9**, 501 (2015)
- 3-10 J. Ho, J. Tatebayashi, S. Sergeant, C. F. Fong, Y. Ota, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "A nanowire-based plasmonic quantum dot laser", Nano Lett. **16**, 2845 (2016)

[4] 量子ナノ構造光物性研究

(量子ドット・量子細線の光物性および量子ドット太陽電池の研究)

- 4-1 Y. Nagamune, Y. Arakawa, S. Tsukamoto, M. Nishioka, S. Sasaki and N. Miura, "Photoluminescence spectra and anisotropic energy shift of GaAs quan-

- turn wires in high magnetic fields", *Phys. Rev. Lett.* **69**, 2963 (1992)
 - 4-2 Y. Toda, O. Moriwaki, M. Nishioka and Y. Arakawa, "Efficient carrier relaxation mechanism in InGaAs/GaAs self-assembled quantum dots based on the existence of continuum states", *Phys. Rev. Lett.* **82**, 4114 (1999)
 - 4-3 X.-Q. Li, H. Nakayama and Y. Arakawa, "Phonon bottleneck in quantum dots: Role of lifetime of the confined optical phonons", *Phys. Rev. B* **59**, 5069 (1999)
 - 4-4 T. Nozawa and Y. Arakawa, "Detailed balance limit of the efficiency of multilevel intermediate band solar cells", *Appl. Phys. Lett.* **98**, 171108 (2011)
 - 4-5 M. Holmes, S. Kako, K. Choi, P. Podemski, M. Arita and Y. Arakawa, "Measurement of an exciton Rabi rotation in a single GaN/Al_xGa_{1-x}N narrow-line-quantum dot using photoluminescence spectroscopy: Evidence for coherent control", *Phys. Rev. Lett.* **111**, 057401 (2013)
 - 4-6 K. Kamide, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Impact of the dark path on quantum dot single photon emitters in small cavities", *Phys. Rev. Lett.* **113**, 143604 (2014)
- (半導体共振器量子デバイス研究)
- 4-7 C. Weisbuch, M. Nishioka, A. Ishikawa and Y. Arakawa, "Observation of the coupled exciton-photon mode splitting in a semiconductor quantum microcavity", *Phys. Rev. Lett.* **69**, 3314 (1992)
 - 4-8 Z. L. Zhang, M. Nishioka, C. Weisbuch and Y. Arakawa, "Demonstration of confined optical field effect in a vertical microcavity by examining the low temperature photon-exciton interaction in two kinds of quantum wells", *Appl. Phys. Lett.* **64**, 1068 (1994)
 - 4-9 K. Aoki, D. Guimard, M. Nishioka, M. Nomura, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Coupling of quantum-dot light emission with a three-dimensional photonic-crystal nanocavity", *Nat. Photonics* **2**, 688 (2008)
 - 4-10 Y. Arakawa, S. Iwamoto, M. Nomura, A. Tandachanurat and Y. Ota, "Cavity quantum electrodynamics and lasing oscillation in single quantum dot-photonic crystal nanocavity coupled systems", *IEEE J. Sel. Topics in Quantum Electron.* **18**, 1818 (2012)
 - 4-11 Y. Ota, R. Ohta, N. Kumagai, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Vacuum Rabi spectra of a single quantum emitter", *Phys. Rev. Lett.* **114**, 143603 (2015)