

末松 安晴

「大容量長距離光ファイバ通信用の単一モード半導体レーザに関する先駆的研究」

SUEMATSU Yasuharu, “Pioneering Research on Single-Mode-Diode Lasers for Wide-Band and Long-Distance Optical Fiber Communication”

1. 略 歴

1960;東京工業大学大学院理工学研究科修了（工学博士）, 1961;東京工業大学工学部助教授, 1973;同教授, 1989;東京工業大学学長, 1987;光集積回路／光ファイバ国際会議 (IIOC' 89) 組織委員長, 1992;電子情報通信学会会長, 1993;Foreign Associate, National Academy of Engineering, USA, 1994;総理府宇宙開発委員会非常勤委員, 1995;通商産業省産業技術融合領域研究所所長, 1997;日本学術会議会員, 1997;高知工科大学学長, 2000;東日本旅客鉄道株式会社社外取締役, 2000;韓国工学ナショナルアカデミー-国外会員, 2001;国立情報学研究所所長, 2001;映像情報メディア学会会長, 2003;文部科学省科学技術・学術審議会会長, 2005;独立行政法人国立科学博物館館友, 2005;中津川市名誉市民, 2009;高知工科大学顧問, 2010;公益財団法人高柳健次郎財団理事長, 2011;東京工業大学名誉教授。



（末松 安晴）

（1992 名誉工学博士；メリーランド大学, 1994 大学名誉博士；サリー大学, 1991 客座教授；清華大学）

主な榮譽

1978;電子通信学会業績賞（山田実, 上林利夫と）, 1983;Valdemar Poulsen Gold Medal, 1983;コミュニケーション功労者内閣総理大臣表彰, 1985;Electronics Letters Premium Award (with F. Koyama, T. Tanbun-Ek, K. Sekartedjyo, N. Eda, K. Furuya), 1986;David Sarnoff Award, 1989;東レ科学技術賞, 1993;放送文化賞, 1994;C & C 賞, 1996;紫綬褒章, 1997;Eduard Rhein Prize, 2003;IEEE James H. Mulligan Jr. Education Medal, 2014;日本国際賞、2015;文化勲章（光通信工学）、2016;SSDM Award (for 1979 Presentation with S. Arai, Y. Itaya, K. Kishino).

2. 要約

末松安晴は、この世に無いものを創り世の中へ貢献するとの心情で、東京工業大学の教授として、大容量長距離光ファイバ通信の具現化を目指して研究, 1963 年 5 月に初の光ファイバ通信実験を行い[5][42], 1979 年に光ファイバが最低損失となる $1.5\mu\text{m}$ 長波長帯の光を出す半導体 (GaInAsP/InP) を開拓, この材料を用いて 1980 年に単一モード・ダイオード・レーザ（動的単一モードレーザとも云われる）を実現し[1], 1983 年に、生産性の高い位相シフト分布帰還レーザを実現した。波長 $1.5\mu\text{m}$ 帯大容量長距離光ファイバ通信は 1992 年頃に具現化してインターネットの発展と共に進歩し[2][41], この位相シフト分布帰還レーザは、別途実証した波長可変レーザと共にその標準レーザとして世界中で広く用いられている。

末松は文部科学省の支援で大学内に「超高速エレクトロニクス・研究センター（1986 年）」とその後継研究施設である「量子効果エレクトロニクス・研究センター（1994 年）」を創設し、60 名の博士学生を指導、光通信工学の学術基盤を開拓した。他方、末松は東京工業大学の学長として「総合情報学部構想」を企画、高知工科大学の創立に参加して人間力の育成を推進、文部科学省の科学技術学術審議会会長として学術の振興に努め、また「岐阜サマー・サイエンス・スクール in 中津川」（創設 1995；中津川市）の実行委員長として若者の科学教育を行なっている。観念として目指すのは「安全と豊かで楽しい社会」である（著書 5.）。

3. 研究

光は人類が制御出来る最も高い周波数の電磁波で、大容量の通信には電波よりも格段に優れている、光通信の研究が行われ始めた中で、大容量の情報を長距離にわたって伝送できるところに光ファイバ通信の本質を見定めた。最低損失波長帯で単一モード光通信の具現化を目指し（図 1）[1]、次の三つの機能を併せ持つ、単一モード・ダイオード・レーザ（動的単一モード (DSM)・レーザとも言う）[2] [18] [23] [31] [29] を開拓した：1) 光ファイバの損失が最低になる波長 $1.5\mu\text{m}$ 帯（この波長帯は研究を進める途中の 1979 年に確定）で光を出し、2) 単一モード光ファイバ内の伝搬定数分散による伝送容量制限を乗り越えるために、単一波長（モード）で安定に動作し、さらに、3) 波長の異なる通信の必然性から、波長が可変であること。こうした目標を達成するために、まず、 $1.5\mu\text{m}$ 帯の光を出す半導体材料 (GaInAsP/InP) を開拓し、それをういて目標の $1.5\mu\text{m}$ 帯単一モード半導体レーザを実現した。

3.1 $1.5\mu\text{m}$ 最低損失波長帯用半導体 (GaInAsP/InP) の開拓

シリカ光ファイバの最低損失波長帯は、1973 年のコーニング社の Donald Keck らにより予測された $1.4\text{--}1.7\mu\text{m}$ 帯用のレーザ材料の開拓に挑戦し[1]、その途上で判明した $1.5\mu\text{m}$ 帯の光を出す半導体 (GaInAsP/InP) を開拓し、1979 年の夏に、 $1.5\mu\text{m}$ 波長帯で動作するレーザの室温連続動作に成功した（図 1、[18]–[20]）。屈折率閉じ込め構造による横モードの安定な制御は（1972 年提案）[9]、酸化しないこの材料により埋込構造（塚田俊久、日立による）で達成した。

3.2 $1.5\mu\text{m}$ 帯単一モード半導体レーザの開拓

上記の GaInAsP/InP を用いて、まず、一個の分布反射器と平面鏡で構成される、図 3 に示す $1.5\mu\text{m}$ 帯の単一モード半導体レーザを 1980 年に実現した[23]–[25]。この実験が契機となって、 $1.5\mu\text{m}$ 帯の片多端面分布帰還レーザが

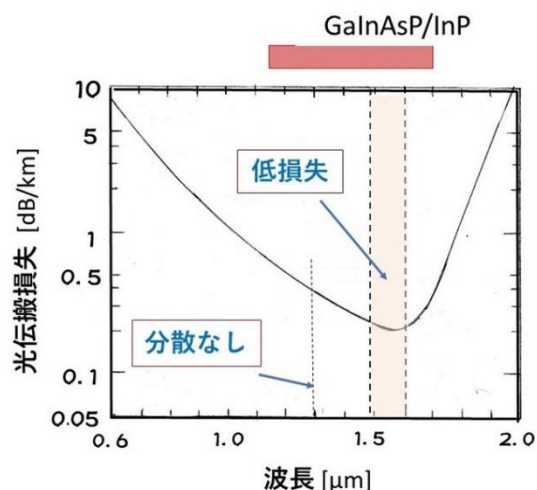


図 1 光ファイバの低損失波長帯用に開拓した半導体材料の GaInAsP/InP 1979 [1]

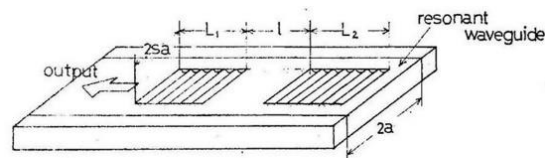


図 2 二つの分布反射器を組み合わせる光の単一モード共振器 1974 [10]

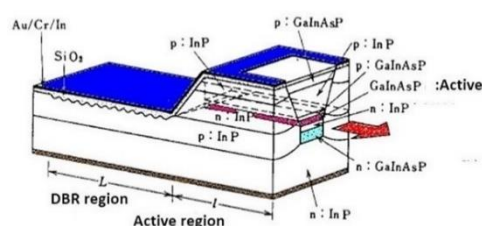
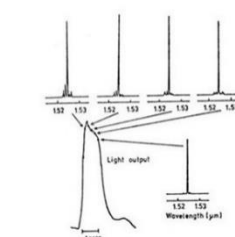


図 3 初の $1.5\mu\text{m}$ 帯単一モード半導体レーザ 1980 [23]

NTT, KDD, そしてベル研などで実用化され長距離通信実験が始められた。

さて、図2の様に2個の分布反射器 (DFB, DBR) を定められた間隔で結合すれば単一波長レーザとなることを1974年に発見した[10]。この原理に基づき, GaInAsP/InP を用い, 1983年に, 二つの分布反射器を向き合わせた単一モード共振器[10]を一体集積した $1.5\mu\text{m}$ 帯の位相シフト分布帰還レーザ (図4) [31][30]を, 古屋一仁らと実現した。この位相シフト分布帰還(DFB)レーザは単一波長共振器が半導体製造プロセスで組み込まれて一貫製造され, 生産性が高い[2]。また, 温度を変えても単一モード性が損なわれないので, 温度で波長を変えるレーザとして, 中心波長の異なる多数のレーザを同一チップ上に一体集積したレーザアレイに進化し, 商用Cバンドの $1.5\mu\text{m}$ 帯最低損失波長帯をカバーしている[4]。その後, 活性層には多層の歪み量子井戸構造が適用されている。こうして, レーザ・マウントを冷却する, 長距離通信用の標準レーザとして, 世界中で広く用いられている。

他方では, 1980年に, 電気同調の単一モード・レーザとして, 分布ブラッグ反射器(DBR)を用いた波長可変レーザを提唱し[33], 1983年に電氣的な波長可変性を $1.5\mu\text{m}$ 帯で実証した(図5)[29]。その後の進化で, 波長可変レーザは実用された[2]。

また, 1988年に実現した, 図6に示す, 能動分布反射器とDBRからなるDRレーザと名付けた単一モード・レーザ[36][37]は, 動作効率がよく, 冷却なしの直接変調による $1.3\mu\text{m}$ 帯(主に AlGaInAs; InP 材料使用)の近距離ネットワークに用いられている。

3.3 レーザ動作理論と能動集積回路そして光ファイバ

光通信の開拓途上では様々な課題を解決する必要があった。1967年に半導体レーザの直接変調の上限を明らかにし[6], 半導体レーザの電子緩和モデルによる利得抑制の基礎理論を確立した[8]。そして, 自然放出光とスペクトル挙動[14], 直接変調下のレーザの線幅を見だし[26], さらに変調方法と光ファイバの伝送容量の関係を定式化した[34]。また, 1977年に, 集積レーザを中核とする能動光集積回路を提案し[13], 1987年に, PICs (Photonic Integrated Circuits) と名付け[35], その発展を図り, 1992年には, 量子箱 (量子ドット) レーザの発振を始めて達成した[39]。

1978年に, 光ファイバ, 特にの光ファイバのケーブル化に伴う不規則曲り損失の解析を行い, 単一モード光ファイバでは損失が無視できるコア径は $10\mu\text{m}$ 程度であることを明らかにした[16]。

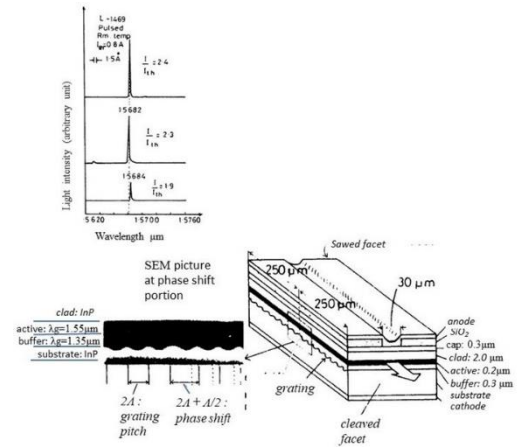


図4 初の位相シフト分布反射器レーザ 1983 [31]

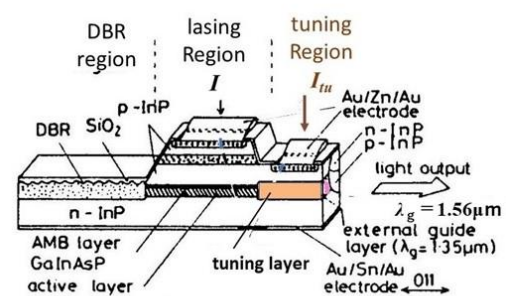
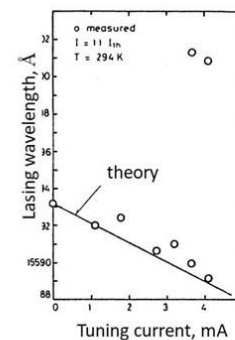


図5 電気同調の波長可変レーザの実証 1983 [29]

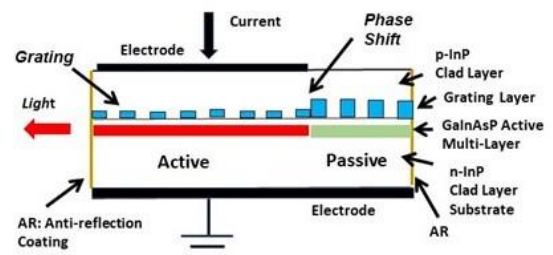


図6 初の分布反射器 (DR) レーザ1988[36]

1989年に、絶縁体・金属からなる人工結晶を用いる共鳴トンネル電子デバイスを提唱 [38]、現在のテラヘルツ (THz) 発振器開拓に繋がっている。

3.4 研究の社会貢献

1. 5 μ m長波長帯の大容量・長距離光ファイバ通信は、光ファイバ、光デバイスや変調方式などの研究・開発と共に、本研究で開拓した単一モード・ダイオード・レーザを標準光源として具現化され、情報通信技術の社会基盤として発展し、インターネットの進歩を支えて今日に至っている。

具体的には、本研究による 1. 5 μ m帯の温度同調の単一モード・ダイオード・レーザを光源とする波長多重 (WDM) 光ファイバ通信システムが陸上の幹線システム (1980 後期) や大陸間海底ケーブル (1992) の長距離用に商用され、さらに 2004 年ごろからは、電気的な波長可変のレーザ、すなわち電気同調の単一モード・ダイオード・レーザが高密度波長多重 (D-WDM) システムの高度化やコヒーレント通信の光源に用いられている。現在、光ファイバ通信は地球を数万回取り巻く高密度の情報ネットワークを形成しており、他方では波長 1. 3 μ m帯の中距離のイーサネット等にも広く用いられている。こうして光ファイバ通信の情報伝送性能指数 (伝送容量 $\times$ 伝送距離) は、それ以前の同軸ケーブルの伝送性能指数の一億倍に達し、情報伝送のコストを格段に低下させた (著書 5.)。これを反映して 1990 年代の中葉から、Google や楽天などのネットワーク産業が続発した。その後、2010 年が近づくと、電子映像のネットワーク利用が普及するとともに、高速伝送を前提としたクラウドを用いる社会へと進んでいる。光通信の発展により大容量情報の即時伝送が日常的となり、ネットワーク社会、そしてデジタル技術文明を生み出す原動力となっている。今日のネット連携社会は、最低損失波長帯の単一モード・ダイオード・レーザを光源とする光ファイバ通信の進歩により、発展し続けている [3]。

4. 特記事項

本研究初期に川上正光工学部長のご配慮で山崎貞一 TDK 社長から莫大な研究費寄付を受け、電子物理工学学科新設経費によるパーキン・エルマー分光器、大学経費で電子ビーム露光装置設置など、最先端の機器が整備され、末武国弘・岸源也両教授、半導体開拓での中込雪男 KDD 研究所長、斎藤成文東大教授の特別推進研究への支援、そして新関暢一 NTT 理事による単一モードシステムの推進、ベル研究所との人物交流などがあり、最先端の研究に挑戦出来た。ここに、ご支援・御指導を頂いた各位、文部科学省、そして優秀な研究協力者諸氏に深謝する (敬称は当時)。

5. 参考資料

- [1] Yasuharu Suematsu, "Long-Wavelength Optical Fiber Communication," (Invited), Proc. IEEE, Vol.71, No.6, pp.692-721 (June 1983).
- [2] Y. Suematsu, "Dynamic Single Mode Lasers," (Invited) Journal of Lightwave Technology, vol. 32, no. 6, pp. 1144-1158, (March 2014).
- [3] 末松安晴「光通信と半導体レーザの研究を振り返って~情報通信社会の到来を目指して~」, (講演) 電子情報通信学会誌, vol.98, no.6, pp.445-453, 2015 年 6 月
- [4] 末松安晴,「動的単一モードレーザの開拓~大容量長距離光ファイバ通信用の半導体レーザ,」(招待) 電子情報通信学会論文誌 C, vol.J100-C, no.10, pp.424-436, 2017.
- [5] 末松安晴「最初の光ファイバ通信は東京工業大学の全学祭か~昭和38年 (1963) 5月26日~」,東工大クロニクル (東京工業大学発行) 1986年10月号, pp.3-4,1986.
- [6] T. Ikegami and Y. Suematsu, "Resonance-Like Characteristics of the Direct Modulation of a Junction Laser," Proc. IEEE, Vol.55, No.1, pp.122-123 (Jan. 1967).
- [7] Y. Suematsu, "Tunable Parametric Oscillator Using a Guided Wave Structure," Japan. J. Appl. Phys., Vol.9, No.7, pp.798-805 (July 1970).
- [8] Y. Nishimura, K. Kobayashi, T. Ikegami, and Y. Suematsu, "Axial-Mode Interactions in a Semiconductor Laser," Tech. Rept. Quantum Electronics, IECE of Japan, Vol.QE71, No.22, pp.1-14, (Sep. 1971).
- [9] Y. Suematsu and M. Yamada, "Transverse mode control in semiconductor laser," IEEE Semiconductor Laser Conf. (May 16, 1972),
- [10] 末松安晴, 林健二「分布反射器とこれを用いたレーザ共振回路の一般解析」昭和 49 年度電子通信学会全国大会, 1200, p. 1203, July 25-27, 1974.
- [11] Y. Suematsu, M. Yamada, and K. Hayashi, "A Multi-Hetero-AlGaAs Laser with Integrated Twin-Guide," Proc. IEEE, Vol.63, No.1, pp.208-209 (Jan. 1975).
- [12] Y. Itaya, Y. Suematsu, and K. Iga, "Carrier Lifetime Measurement of GaInAsP/InP Double-Heterostructure Lasers," Japan. J. Appl. Phys., Vol.16, No.6, pp.1057-1058 (June 1977).

- [13] Yasuharu Suematsu, "Monolithic Integration of Optical Circuits and Related Twin-Guide Lasers," International Conference of Integrated Optics and Optical Communications, B1-1, Tokyo, (July 1977).
- [14] Y. Suematsu and K. Furuya, "Theoretical Spontaneous Emission Factor of Injection Lasers," Trans. IECE of Japan, Vol.E60, No.9, pp.467-472 (Sep. 1977).
- [15] H. Kawanishi, Y. Suematsu, Y. Itaya, and S. Arai, " $\text{Ga}_{x-1}\text{In}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ -InP Injection Laser Partially Loaded with Distributed Bragg Reflector," Japan. J. Appl. Phys., Vol.17, No.8, pp.1439-1440 (Aug. 1978).
- [16] K. Furuya and Y. Suematsu, "Random Bend Losses in Single-Mode Optical-Fiber Cables: Power-Spectrum Estimation from Spectral Losses," Electron. Lett., Vol.4, No.19, pp.653-654 (Sep. 1978).
- [17] S. Arai, Y. Itaya, Y. Suematsu, K. Kishino, and S. Katayama, "Condition of LPE Growth for Lattice matched GaInAsP/InP DH Lasers with (100) Substrate in the Range of 1.2-1.5 μm ," Japan. J. Appl. Phys., Vol.17, No.11, pp.2067-2068 (Nov. 1978).
- [18] S. Arai, Y. Itaya, Y. Suematsu, and K. Kishino, "1.5-1.6 μm wavelength (100) GaInAsP/InP DH lasers," 11th Conf. on Solid State Devices (SSDM), Tokyo, B-3-4 (Aug. 1979).
- [19] S. Arai, M. Asada, Y. Suematsu, and Y. Itaya, "Room Temperature CW Operation of (100) GaInAsP/InP DH Laser Emitting at 1.51 μm ," Japan. J. Appl. Phys., Vol.18, No.12, pp. 2333-2334 (Dec. 1979).
- [20] S. Arai, Y. Suematsu, and Y. Itaya, "1.11-1.67 μm (100) GaInAsP/InP Injection Lasers Prepared by Liquid Phase Epitaxy," IEEE J. Quantum Electron., Vol.QE-16, No.2, pp.197-205 (Feb. 1980).
- [21] Y. Sakakibara, K. Furuya, K. Utaka, and Y. Suematsu, "Single Mode Oscillation Under High-Speed Direct Modulation in GaInAsP/InP Integrated Twin-Guide Lasers with Distributed Bragg Reflectors," Electron. Lett., Vol.16, No.12, pp.456-458 (June 1980).
- [22] K. Stubkjaer, Y. Suematsu, M. Asada, S. Arai, and A. R. Adams, "Measurement of Refractive-Index Variation with Free Carrier Density and Temperature for 1.6 μm GaInAsP/InP Lasers," Electron. Lett., Vol.16, pp.895-896 (Nov. 1980).
- [23] K. Utaka, K. Kobayashi and Y. Suematsu, "Lasing Characteristics of 1.5-1.6 μm GaInAsP/InP Integrated Twin-Guide Lasers with First-Order Distributed Bragg Reflectors," IEEE J. Quantum Electron., Vol.QE-17, No.5, pp.651-658 (May 1981).
- [24] K. Utaka, K. Kobayashi, F. Koyama, Y. Abe, and Y. Suematsu, "Single Wavelength Operation of 1.53 μm GaInAsP/InP BH Integrated Twin Guide Lasers with Distributed Bragg Reflector under Direct Modulation up to 1GHz," Electron. Lett., Vol.17, No.11, pp.368-369 (May 1981).
- [25] K. Kobayashi, K. Utaka, Y. Abe, and Y. Suematsu, "CW Operation of 1.5-1.6 μm Wavelength GaInAsP/InP BH Integrated Twin Guide Lasers with Distributed Bragg Reflector," Electron. Lett., Vol.17, No.11, pp.366-368 (May 1981).
- [26] F. Koyama, S. Arai, Y. Suematsu, and K. Kishino, "Dynamic Spectral Width of Rapidly Modulated 1.58 μm GaInAsP/InP Buried-Heterostructure Distributed-Bragg-Reflector Integrated- Twin-Guide Lasers," Electron. Lett., Vol.15, No.25, pp.938-940 (Dec. 1981).
- [27] M. Yamada and Y. Suematsu, "Analysis of Gain Suppression in Undoped Injection Lasers," J. Appl. Phys., Vol.52, No.4, pp.2653-2664 (Apr. 1981).
- [28] M. Asada and Y. Suematsu, "Measurement of Spontaneous Emission Efficiency and Nonradiative Recombinations in 1.58 μm Wavelength GaInAsP/InP Crystals," Appl. Phys. Lett., Vol.41, No.4, pp.353-355 (Aug. 1982).
- [29] Y. Tohmori, Y. Suematsu, H. Tsushima, and S. Arai, "Wavelength Tuning of GaInAsP/InP Integrated Laser with Butt-Jointed Built-in Distributed Bragg Reflector," Electron. Lett., Vol.19, No.17, pp.656-657 (Aug. 1983).
- [30] K. Furuya, K. Yoshida, K. Honjo, and Y. Suematsu, "Precise Control of Grating Pitch by Electron-Beam Exposure System for Integrated Optics," Trans. IECE of Japan. Vol.E66, No.9, pp.561-562 (Sept. 1983).
- [31] K. Sekartedjo, N. Eda, K. Furuya, Y. Suematsu, F. Koyama, and T. Tanbun-Ek, "1.5 μm Phase-Shifted DFB Lasers for Single-Mode Operation," Electron. Lett., Vol.20, No.2, pp.80-81 (Jan. 1984).
- [32] M. Asada, A. Kameyama, and Y. Suematsu, "Gain and Intervalence Band Absorption in Quantum-Well Lasers," IEEE J. Quantum Electron., Vol.QE-20, No.7, pp.745-753 (July 1984)
- [33] 東盛裕一, 蔣霄, 末松安晴「半導体レーザの波長制御」電子通信学会研究会資料, 0QE84-81, pp. 15-22, 1984.
- [34] F. Koyama and Y. Suematsu, "Analysis of Dynamic Spectral Linewidth of Dynamic-Single-Mode (DSM) Lasers and Related Transmission Bandwidth of Single-Mode Fibers," IEEE J. Quantum Electron., Vol.QE-21, No.4, pp.292-297 (Apr. 1985).
- [35] Y. Suematsu and S. Arai, "Integrated Optics Approach for Advanced Semiconductor Lasers," Proc. IEEE, Vol.75, No.11, pp.1477-1487 (Nov. 1987).
- [36] K. Komori, S. Arai, Y. Suematsu, M. Aoki, and I. Arima, "Proposal of Distributed Reflector (DR) Structure for High Efficiency Dynamic Single Mode (DSM) Lasers," Trans. IEICE of Japan, Vol.E71, No.4, pp.318-320 (Apr. 1988).
- [37] S. Pellegrino, K. Komori, H. Suzuki, K. S. Lee, S. Arai, Y. Suematsu, and M. Aoki, "Novel Single-Longitudinal-Mode 1.5 μm GaInAsP/InP Distributed Reflector (DR) Laser," Electron. Lett., Vol.24, No.7, pp.435-437 (Mar. 1988).
- [38] Y. Chaki, T. Sakaguchi, M. Asada, and Y. Suematsu, "Proposal of Space Charge Limited Insulator Tetroide with High-Speed Response Using Metal and Insulator," Trans. IEICE of Japan, Vol.E72, No.4, pp.313-314 (Apr. 1989).
- [39] H. Hirayama, K. Matsunaga, M. Asada, and Y. Suematsu, "Lasing action of $\text{Ga}_{0.67}\text{In}_{0.33}\text{As}$ /GaInAsP/InP tensile-strained quantum-box laser," Electron. Lett., Vol.30, No.2, pp.142-143, (Jan. 1994).
- [40] Y. Suematsu and S. Arai, "Single-Mode Semiconductor Lasers for Long-Wavelength Optical Fiber Communications and Dynamics of Semiconductor Lasers," Journal of Selected Topics on Quantum Electronics, Millennium Issue, Vol.6, No.6, pp.1436-1449 (Nov./Dec. 2000).
- [41] 「光通信用半導体レーザ (1987)」戦後日本のイノベーション 100 選, (公財) 発明協会 2017.
- [42] 「世界初の光ファイバ通信実験に用いられた変調素子 (ADP 結晶)」と実験のレプリカ, 重要科学技術史資料 第 00272 号, 国立科学博物館 (2019).

主な著書:

1. 末松安晴「電磁気学」, 共立出版, 1973. 2. 末松安晴, 伊賀健一「光ファイバ通信入門」オーム社, 1976 (英・仏・中国・韓国・イラン語訳, 1978 年度電子情報通信学会著述賞) {第 5 版 3 刷 (2020-1)} . 3. 末松安晴編著「半導体レーザと光集積回路」オーム, 1984.
4. Y. Suematsu & A. Adams, coedited, "Semiconductor Lasers and Photonic Integrated Circuits," Ohm and Chapman & Hall Co., 1994. 5. 末松安晴「つながる世界～ネット社会への進化とデジタル化～」, (Amazon Services International Inc. Kindle, 2019).

(2021-7-10 末松安晴-談)