

日本学士院賞 受賞者

中 沢 正 隆  
なかざわ まさたか



専攻学科学目 電子工学・通信工学

生 年 月 昭和二十七年 九月  
略 歴 昭和五〇年 三月  
同 五五年 三月  
同 五五年 三月  
同 五五年 四月  
同 五九年 九月  
平成 六年 四月  
同 一一年 四月  
同 一一年 四月  
同 一三年 四月  
同 二〇年 四月  
同 二二年 四月  
同 一三年一〇月  
同 二四年 四月

金沢大学工学部電子工学科卒業  
東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了  
工学博士

日本電信電話公社（茨城電気通信研究所）入社  
米国マサチューセッツ工科大学 Research Laboratory of Electronics 客員研究員

NTT 研究開発本部特別研究員グループリーダー  
NTT 電気通信研究所客員教授  
NTT R & D フェロー

東北大学電気通信研究所教授（現在に至る）

東北大学 Distinguished Professor（現在に至る）

東北大学電気通信研究所長（平成二五年三月まで）

東北大学電気通信研究機構長（現在に至る）

東北大学国際高等研究教育機構長（現在に至る）

## 工学博士中沢正隆氏の「エルビウム光フ アイバ増幅器の実現とそれを用いた光通 信の高度化に関する貢献」に対する授賞 審査要旨

中沢正隆氏は半導体レーザー励起エルビウム添加光ファイバ増幅器 (erbium doped fiber amplifier, EDFA) を世界で初めて実現した。これにより、高性能広帯域光増幅器を中継器に用いる長距離光通信が実用化され、情報通信インターネットの飛躍的發展に貢献している。半導体レーザーを光源とし、光ファイバを伝送路とする光通信には、最初0.84 $\mu\text{m}$ の波長が用いられたが、光ファイバの低損失化が進んで一九七〇年代に理論的限界に達し、波長1.5~1.6 $\mu\text{m}$ でおおよそ0.2dB/kmの伝送損失が実現されている。それでも無中継通信距離は100kmが限界であり、長距離通信には中継器が必要になる。しかし、以前の光増幅器はアルゴンイオンレーザーまたは液体窒素冷却カラーセンタレーザー励起を用いるため大型で大電力を必要とし、しかも信頼性が低く、光通信の中継には使えなかった。そこで光通信の中継には、光信号を検波して信号を電氣的に増幅し、増幅された

信号で次のレーザーを变調して次の中継点へ伝送しなければならなかった。したがって伝送する信号の帯域幅は電気増幅器の帯域幅で制限されていた。

中沢氏は、最初一九八四年、エルビウム添加ガラスレーザーに着目して実験を進め、一九八九年には極めて小形で高効率の半導体レーザー励起エルビウム光ファイバ増幅器を発明した。そして光ソリトンの増幅と伝送にも成功している。この発明以後世界各国で光増幅器を用いた伝送実験が始まり、波長多重通信、太平洋横断長距離通信などが実現して、光通信技術を一挙に革新した。そして今日では光情報通信技術の基本となる陸上および海底の大規模光システムが実用化され、光信号処理、レーザー周波数制御と波長変換などにも幅広く利用されている。これにより、世界中の人々が、いつでも、どこでも、誰とでも情報交換できるグローバルネットワークが実現したといっても過言ではない。

光技術の特徴はその高速性と電磁波としてのコヒーレンスにあるが、中沢氏はEDFAを用いて繰り返し周波数10~40GHz、パルス幅3~0.8psの超短パルスレーザー、ならびにアセチレン分子に周波数を安定化したレーザーを独自のアイデアにより実現している。さらにそれらを光通信に応用して、優れた研究成果を挙げている。すなわち、超短パルスレーザーでは、二〇〇〇年に世界最高速度の一・二八

テラビット毎秒の単一チャンネル伝送に成功している。そして周波数安定化レーザを利用して、1024QAM (Quadrature Amplitude Modulation) によるコヒーレント多重伝送を二〇〇六年に実現した。この成果は、従来の光通信では周波数利用効率がおよそ0.1bit/s/Hzであったのに対して、10bit/s/Hz以上というシャノン限界に近い高効率である。またカーボンナノチューブを可飽和吸収体として用いた簡便なフェムト秒レーザを作っている。

光通信のインターネットトラフィックは年率四〇%、二〇年で一〇〇〇倍に増加し、これは中沢氏の先駆的な研究によって実現されたということが出来る。しかし時間多重通信と波長多重通信技術の延長では限界に近付きつつある。この限界を越えるために、多値変調通信技術、マルチコアファイバ伝送、マルチモード多重通信技術の研究開発が中沢氏のリーダーシップの下に推進されている。

これらの研究成果はおよそ四二〇件の研究論文、二二六〇件以上の国際会議報告で発表されており、取得した特許には、1.48 $\mu$ mLD 起エルビウム光ファイバ増幅器(登録二二二八三三七号)、光ファイバラマン増幅器を用いた光伝送方式(登録一三三八三六九一号)、エルビウム光ファイバ増幅器を用いた光ソリトン伝送方式(登録二六五九二三四号)、分散マネージソリトン伝送方式(登録二八二五二〇九号)など二〇九件と、外国特許一三件がある。また、紫綬褒

章など多数の内外の賞を受賞している。そして光通信技術の研究開発に関する中沢氏のリーダーシップは世界的に極めて高い評価を受けている。

### 主要な論文目録

重要と思われる論文を分野ごとに分けて記載し、特に重要と思われる論文に下線を付した。

- エルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA) 関連
- [1] M. Nakazawa, Y. Kimura, and K. Suzuki, "Efficient Er<sup>3+</sup>-doped optical fiber amplifier pumped by a 1.48  $\mu$ m InGaAsP laser diode," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 54, pp. 295-297 (1989).
  - [2] M. Nakazawa, Y. Kimura, and K. Suzuki, "Soliton amplification and transmission with Er<sup>3+</sup>-doped fibre repeater pumped by GaInAsP diode," *Electron. Lett.*, vol. 25, pp. 199-200 (1989).
  - [3] K. Suzuki, Y. Kimura, and M. Nakazawa, "Subpicosecond soliton amplification and transmission using Er<sup>3+</sup>-doped fibers pumped by InGaAsP laser diodes," *Opt. Lett.*, vol. 14, pp. 865-867 (1989).
  - [4] M. Nakazawa, Y. Kimura, K. Suzuki, and H. Kubota, "Wavelength multiple soliton amplification and transmission with an Er<sup>3+</sup>-doped optical fiber," *J. Appl. Phys.*, vol. 66, pp. 2803-2812 (1989).
  - [5] Y. Kimura, K. Suzuki, and M. Nakazawa, "46.5 dB gain in Er<sup>3+</sup>-doped fibre amplifier pumped by 1.48  $\mu$ m GaInAsP laser diodes," *Electron. Lett.*, vol. 25, pp. 1656-1657 (1989).
  - [6] Y. Kimura, K. Suzuki, and M. Nakazawa, "Pump wavelength dependence of the gain factor in 1.48  $\mu$ m-pumped Er<sup>3+</sup>-doped fiber amplifiers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 56, pp. 1611-1613 (1990).

- [17] M. Nakazawa, Y. Kimura, and K. Suzuki, "High gain erbium fibre amplifier pumped by 800 nm band," *Electron. Lett.*, vol. 26, pp. 548–549 (1990).
- [18] M. Nakazawa, K. Kurokawa, H. Kubota, K. Suzuki, and Y. Kimura, "Femtosecond erbium-doped optical fiber amplifier," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, pp. 653–655 (1990).
- [19] Y. Kimura, M. Nakazawa, and K. Suzuki, "Ultra-efficient erbium-doped fiber amplifier," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, pp. 2635–2637 (1990).
- [10] Y. Kimura and M. Nakazawa, "Gain characteristics of erbium-doped fibre amplifiers with high erbium concentration," *Electron. Lett.*, vol. 28, pp. 1420–1421 (1992).
- 超短パルスレーザー**
- [11] M. Nakazawa, E. Yoshida, and Y. Kimura, "Ultrafast harmonically and regeneratively modelocked polarization-maintaining erbium fibre ring laser," *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 1603–1604, Sep. (1994).
- [2] M. Nakazawa, E. Yoshida, H. Kubota, and Y. Kimura, "Generation of a 170 fs, 10 GHz transform-limited pulse train at 1.55  $\mu\text{m}$  using a dispersion-decreasing, erbium-doped active soliton compressor," *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 2038–2040, Nov. (1994).
- [3] E. Yoshida and M. Nakazawa, "80–200 GHz erbium-doped fibre laser using a rational harmonic mode-locking technique," *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 1371–1372, July (1996).
- [4] K. Tamura and M. Nakazawa, "Dispersion-tuned harmonically mode-locked fiber laser for self-synchronization to external clock," *Opt. Lett.*, vol. 21, pp. 1984–1986, Dec. (1996).
- [5] M. Nakazawa, E. Yoshida, and K. Tamura, "Ideal phase-locked-loop (PLL) operation of a 10 GHz erbium-doped fibre laser using regenerative modelocking as an optical voltage controlled oscillator," *Electron. Lett.*, vol. 33, pp. 1318–1319, July (1997).
- [6] M. Nakazawa, H. Kubota, A. Sahara, and K. Tamura, "Time-domain ABCD matrix formalism for laser mode-locking and optical pulse transmission," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 34, pp. 1075–1081, July (1998).
- [7] M. Nakazawa and E. Yoshida, "A 40 GHz, 850 fs regeneratively FM mode-locked polarization-maintaining erbium fiber ring laser," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 12, pp. 1613–1615, Dec. (2000).
- [8] M. Nakazawa and K. Suzuki, "Cesium optical atomic clock: an optical pulse that tells the time," *Opt. Lett.*, vol. 26, pp. 635–637, May (2001).
- [9] M. Nakazawa, K. Kasai, and M. Yoshida, " $\text{C}_2\text{H}_2$  absolutely optical frequency-stabilized and 40 GHz repetition-rate-stabilized, regeneratively mode-locked picosecond erbium fiber laser at 1.53  $\mu\text{m}$ ," *Opt. Lett.*, vol. 33, pp. 2641–2643, Nov. (2008).
- 固体レーザー**
- [1] M. Nakazawa, M. Tokuda, and N. Uchida, "Lasing characteristics of a  $\text{Nd}^{3+}$ :YAG laser with a long optical-fiber resonator," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 73, pp. 838–842 (1983).
- [2] Y. Kimura and M. Nakazawa, "Multiwavelength cw laser oscillation in a  $\text{Nd}^{3+}$  and  $\text{Er}^{3+}$  doubly doped fiber laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 53, pp. 1251–1253 (1988).
- [3] K. Suzuki, Y. Kimura and M. Nakazawa, "An 8 mW cw  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber laser pumped by 1.46  $\mu\text{m}$  InGaAsP laser diodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 28, pp. L1000–L1002 (1989).
- [4] K. Kasai, M. Yoshida, and M. Nakazawa, "Acetylene ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) stabilized single-polarization fiber laser," *IEEE Trans. Electron.*, vol. 38, pp. 708–715, Sep. (2005).
- [5] K. Kasai and M. Nakazawa, "FM-eliminated  $\text{C}_2\text{H}_2$  frequency-stabilized laser diode with an RIN of  $-135$  dB/Hz and a linewidth of 4 kHz," *Opt. Lett.*, vol. 34, pp. 2225–2227, July (2009).

- [6] K. Kasai, A. Mori, and M. Nakazawa, "1.5  $\mu\text{m}$  frequency-stabilized  $\lambda/4$ -shifted DFB LD employing an external fiber ring cavity with a linewidth of 2.6 kHz and a RIN of -135 dB/Hz" *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 23, pp. 1046–1048, Aug. (2011).
- 超距離光通信技術**
- [1] M. Nakazawa, T. Yamamoto, K. R. Tamura, "1.28 Tbit/s-70 km OTDM transmission using third- and fourth-order simultaneous dispersion compensation with a phase modulator," *Electron. Lett.*, vol. 36, pp. 2027–2029, Nov. (2000).
- [2] M. Nakazawa, T. Hirooka, F. Futami, and S. Watanabe, "Ideal distortion-free transmission using optical Fourier transformation and Fourier transform-limited optical pulses," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, pp. 1059–1061, Apr. (2004).
- [3] M. Nakazawa and T. Hirooka, "Distortion-free optical transmission using time-domain optical Fourier transformation and transform-limited optical pulses," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 22, pp. 1842–1855, Sep. (2005).
- [4] T. Hirooka, K. Hagiuda, T. Kumakura, K. Osawa, and M. Nakazawa, "160 Gb/s-600 km OTDM transmission using time-domain optical Fourier transformation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, pp. 2647–2649, Dec. (2006).
- [5] P. Guan, H. C. Hansen Mulvad, Y. Tomiyama, T. Hirano, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "Single-channel 1.28 Tbit/s-525 km DQPSK transmission using ultrafast time-domain optical Fourier transformation and nonlinear optical loop mirror," *IEICE Trans. Comm.*, vol. E94-B, pp. 430–436, Feb. (2011).
- [6] P. Guan, T. Hirano, K. Harako, Y. Tomiyama, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "2.56 Tbit/s/ch Polarization-Multiplexed DQPSK Transmission over 300 km Using Time-Domain Optical Fourier Transformation," *Opt. Express*, vol. 19, pp. B567–B573, Dec. (2011).
- [7] M. Nakazawa, T. Hirooka, P. Ruan, and P. Guan, "Ultrahigh-speed" orthogonal" TDM transmission with an optical Nyquist pulse train," *Opt. Express*, vol. 20, pp. 1129–1140, Jan. (2012).
- 100 Gbps 光通信技術**
- [1] M. Nakazawa, M. Yoshida, K. Kasai, and J. Hongou, "20 Msymbol/s, 64 and 128 QAM coherent optical transmission over 525 km using heterodyne detection with frequency-stabilised laser," *Electron. Lett.*, vol. 42, pp. 710–712, June (2006).
- [2] M. Yoshida, H. Goto, K. Kasai, and M. Nakazawa, "64 and 128 coherent QAM optical transmission over 150 km using frequency-stabilized laser and heterodyne PLL detection," *Opt. Express*, vol. 16, pp. 829–840, Jan. (2008).
- [3] M. Nakazawa, S. Okamoto, T. Omiya, K. Kasai, and M. Yoshida, "256-QAM (64 Gb/s) coherent optical transmission over 160 km with an optical bandwidth of 5.4 GHz," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, pp. 185–187, Feb. (2010).
- [4] M. Nakazawa, T. Hirooka, M. Yoshida, and K. Kasai, "Ultrafast coherent optical communication," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 18, pp. 363–376, Jan. (2012).
- [5] T. Hirooka, P. Ruan, P. Guan, and M. Nakazawa, "Highly dispersion-tolerant 160 Gbaud optical Nyquist pulse TDM transmission over 525 km," *Opt. Express*, vol. 20, pp. 15001–15008, July (2012).
- [6] Y. Koizumi, K. Toyoda, M. Yoshida, and M. Nakazawa, "1024 QAM (60 Gbit/s) single-carrier coherent optical transmission over 150 km," *Opt. Express*, vol. 20, pp. 12508–12514, May (2012).
- 光通信技術**
- [1] M. Nakazawa, K. Suzuki, and Y. Kimura, "3.2-5 Gb/s, 100 km error-free soliton transmission with erbium amplifiers and repeaters," *IEEE Photon. Techn. Lett.*, vol. 2, pp. 216–219 (1990).
- [2] H. Kubota and M. Nakazawa, "Long distance optical soliton transmission with

- lumped amplifiers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-26, pp. 692–700 (1990).
- [3] M. Nakazawa, E. Yamada, H. Kubota, and K. Suzuki, "10 Gbit/s soliton data transmission over one million kilometres," *Electron. Lett.*, vol. 27, pp. 1270–1272 (1991).
- [4] M. Nakazawa, K. Suzuki, E. Yamada, H. Kubota, Y. Kimura and M. Takaya, "Experimental demonstration of soliton data transmission over unlimited distances with soliton control in time and frequency domains", *Electron. Lett.*, vol. 29, pp. 729–730, Apr. (1993).
- [5] H. Kubota and M. Nakazawa, "Soliton transmission control in time and frequency domains", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, pp. 2189–2197, July (1993).
- [6] M. Nakazawa, K. Suzuki, E. Yoshida, T. Kioh and M. Kawachi, "160 Gbit/s soliton data transmission over 200km", *Electron. Lett.*, Vol. 31, pp. 565 – 566, Apr. (1995).
- [7] M. Nakazawa, Y. Kimura, K. Suzuki, H. Kubota, T. Komukai, E. Yamada, T. Sugawa, E. Yoshida, T. Yamamoto, T. Inai, A. Sahara, O. Yamauchi and M. Umezawa, "Soliton transmission at 20 Gbit/s over 2000 km in Tokyo metropolitan optical network", *Electron. Lett.*, vol. 31, pp. 1478 – 1479, Aug. (1995).
- [8] M. Nakazawa, K. Suzuki and H. Kubota, "Single-channel 80 Gbit/s soliton transmission over 10000 km using in-line synchronous modulation," *Electron. Lett.*, vol. 35, pp. 162–163, Jan. (1999).
- [9] M. Nakazawa, H. Kubota, K. Suzuki, E. Yamada and A. Sahara, "Ultrahigh-speed, long-distance TDM and WDM soliton transmission technologies," *IEEE, J. Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, pp. 1–34, Apr. (2000).