

光で時を刻む新Cs原子“光時計”の研究開発

研究代表者

中沢 正隆 東北大学電気通信研究所

研究分担者

吉田 真人[†] 廣岡 俊彦[†] 池上 健^{††} 萩本 憲^{††} 渡部 謙一^{††}

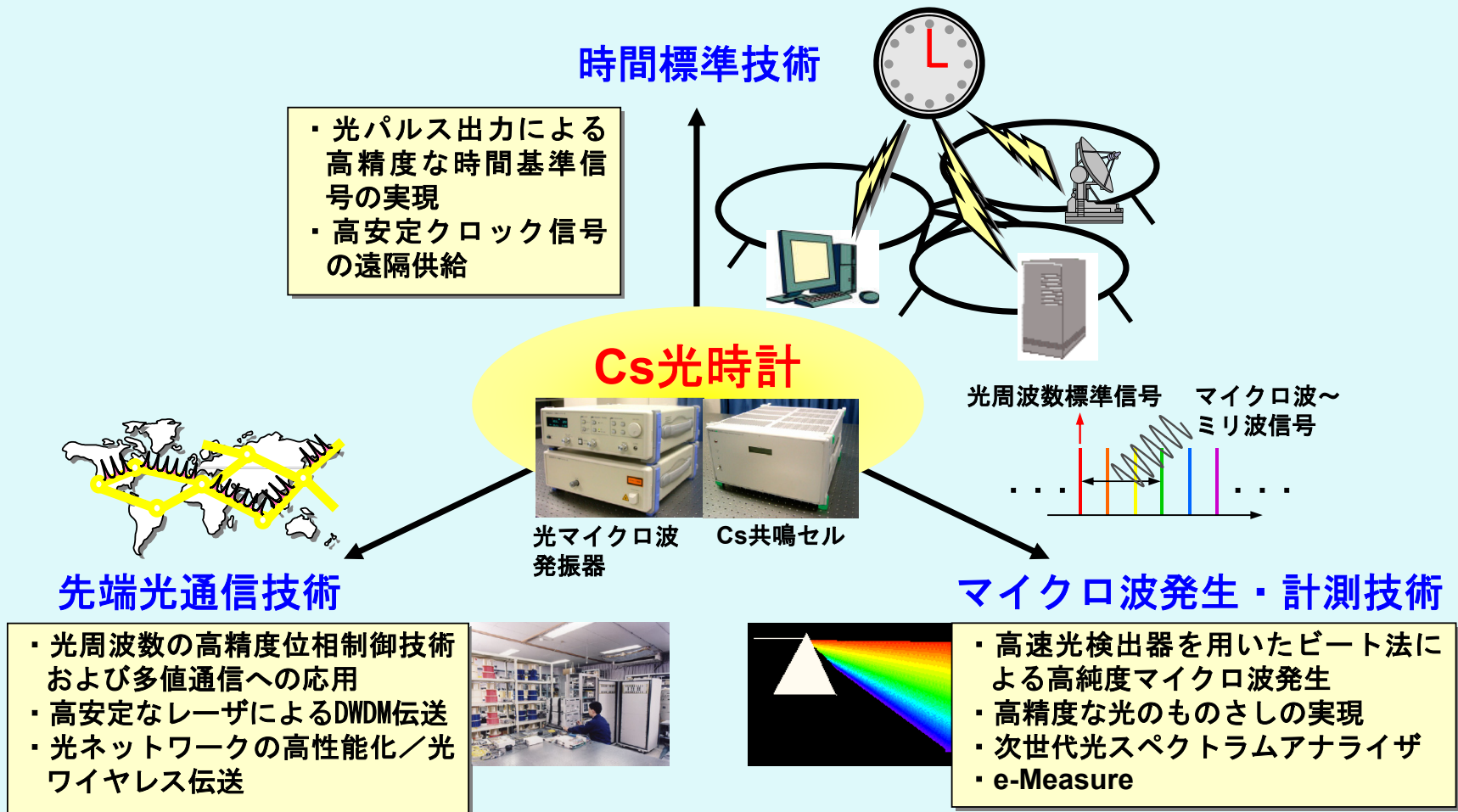
飯田 力弘^{†††} 熊谷 芳宏^{†††}

[†]東北大学電気通信研究所 ^{††}産業技術総合研究所 ^{†††}横河電機株式会社

研究期間 平成17年度～平成19年度

本研究の目的

高安定なピコ秒パルスレーザ(光マイクロ波発振器)を利用した新たなCs光原子発振器
“光時計”を世界に先駆けて実現する。



研究内容およびその役割分担

(1) ラック搭載型超高安定Cs光原子時計の開発(東北大学、横河電機担当)

高安定な光マイクロ波発振器(モード同期ファイバレーザ)とCs原子の二重共鳴セルを組み合わせ、産総研が所有する一次標準器と同程度の短期安定度を有する超高安定なCs光原子時計をラックマウントサイズで実現した。

(Csの原子発振器と同じ安定度の光パルスの発生が可能)



ラック搭載型Cs光時計

(2) CPT法を用いた小型Cs光原子時計の開発(産総研担当)

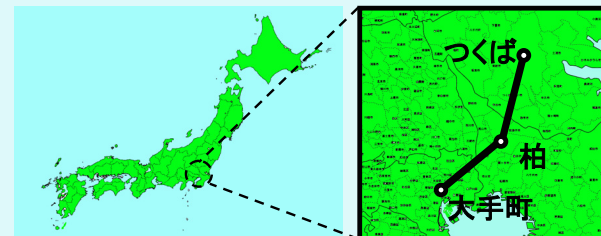
低コストで小型のCs光原子時計の実現を目指し、CPT (Coherent Population Trapping) 法を用いた小型Cs共鳴セルの開発を行なった。



小型Cs共鳴セル
(Φ25 mm, 長さ25 mm)

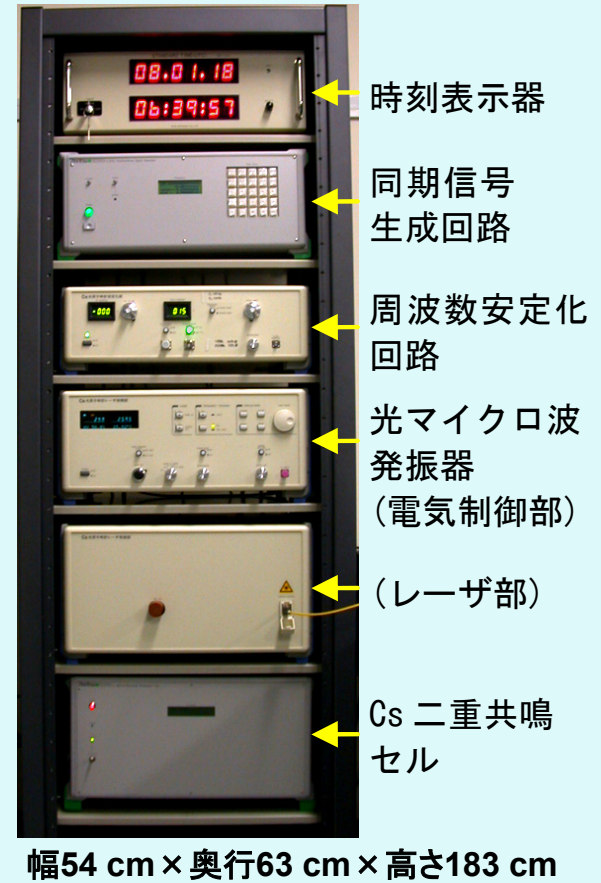
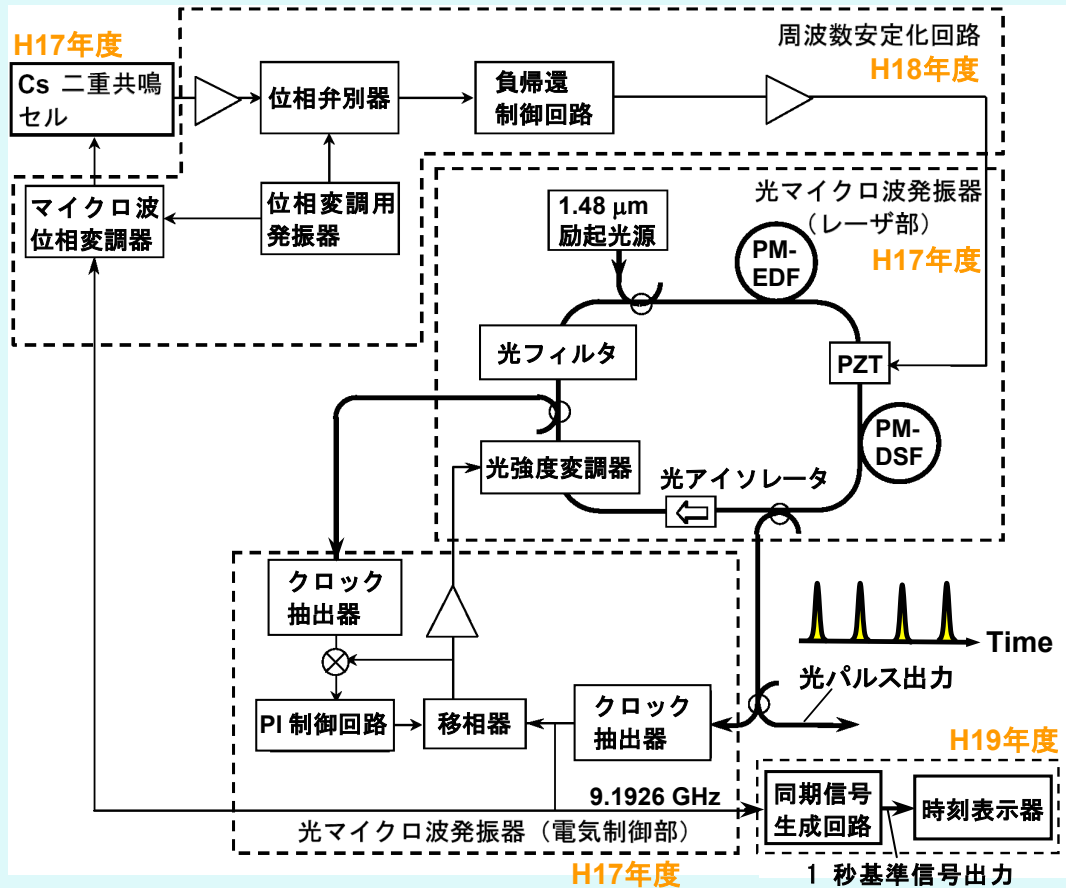
(3) Cs光原子時計の出力光クロック信号の光ファイバ配信実験(東北大学担当)

JGN II 光ファイバネットワーク(つくばー大手町間往復200 km)および実験室に配置した225 km、525 kmの光ファイバ伝送路を用いて、(1)で作製したCs光原子時計から出力される光パルス信号(クロック信号)の光ファイバ配信実験を行ない、伝送に伴う高精度クロック信号のSN比、ジッタ、および周波数安定度の変化について詳細に測定した。



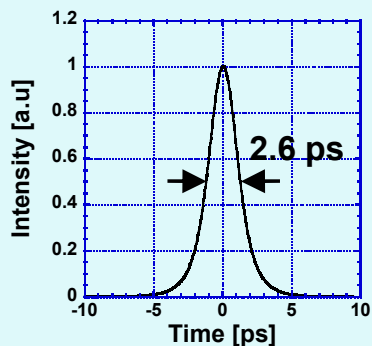
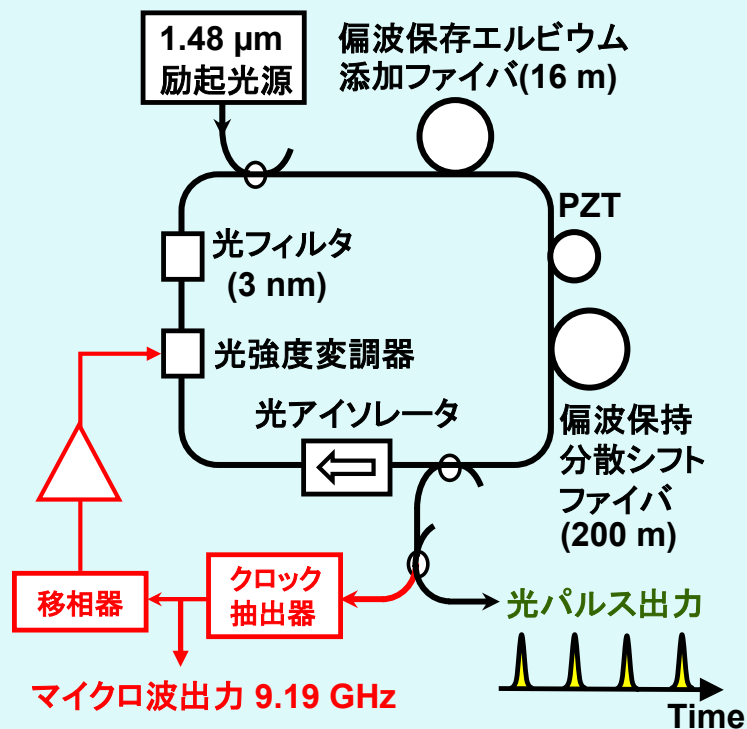
JGN II 光ファイバネットワーク

(1)ラック搭載型超高安定Cs光原子時計の開発

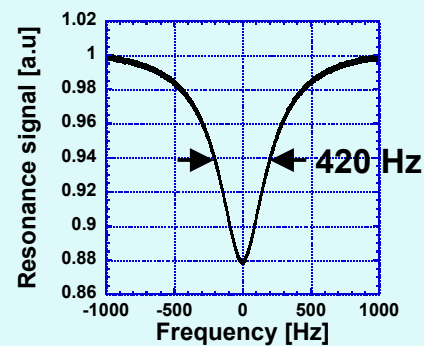
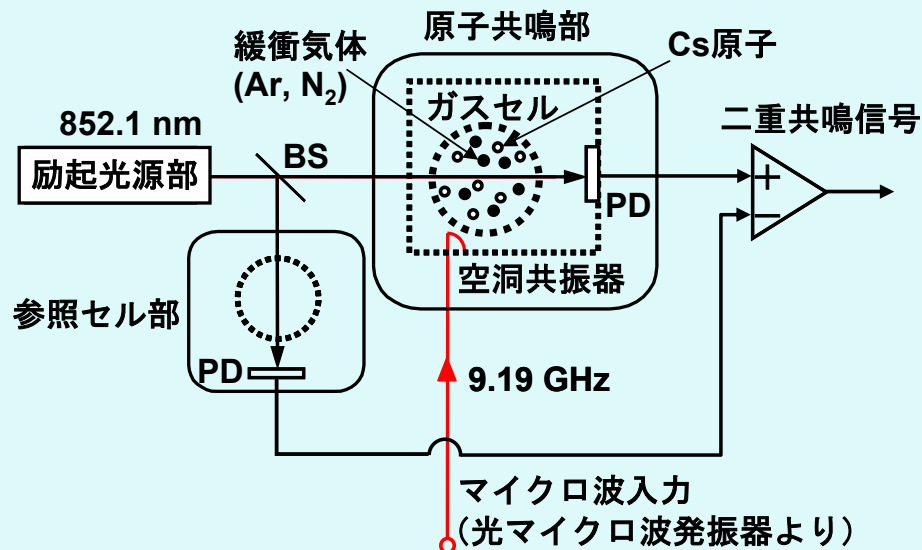


従来のCs原子時計はレーザではなく水晶発振器を用いており、光パルスの発生が出来ない。このため光ネットワークとなじみが薄い。

光マイクロ波発振器およびCs二重共鳴セルの構成

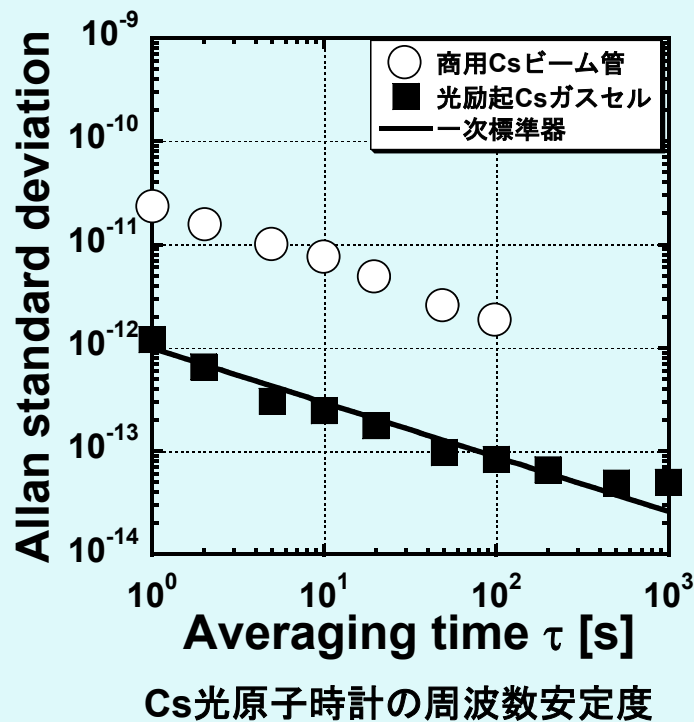


パルス波形 (自己相関)



二重共鳴線スペクトル

Cs光原子時計の周波数安定度評価



平均時間 $\tau=1$ s

商用Csビーム管 : 2.4×10^{-11}

光励起Csガスセル : 1.2×10^{-12}

平均時間 $\tau=100$ s

商用Csビーム管 : 1.9×10^{-12}

光励起Csガスセル : 8.8×10^{-14}

(36万年に1秒のずれ)

* 参考

AIST一次標準器 : $8 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$

- 光励起Csガスセルを用いることにより、周波数安定度は平均時間1 sで 1.2×10^{-12} 、100 sで 8.8×10^{-14} に達し、商用Csビーム管を用いた場合に比べ20倍以上安定度が向上した。
- ラック搭載型のサイズにおいて、全長約3 mの大型のAIST一次標準器と同等の短期安定度を実現することに成功した。

(2) CPT法を用いた小型Cs原子光時計の開発

Coherent Population Trapping (CPT) 法:

原子のコヒーレンスを用い、マイクロ波を用いず光だけでマイクロ波遷移を検出する方法。

二重共鳴方式

- マイクロ波を原子に直接照射
- マイクロ波共振器が必要
- 寸法がマイクロ波の波長(～数cm)より小さくできない。

CPT方式

- レーザ光を原子に照射
- マイクロ波共振器が不要
- 寸法の制限がなくなり、原子時計の超小型化が可能となる。

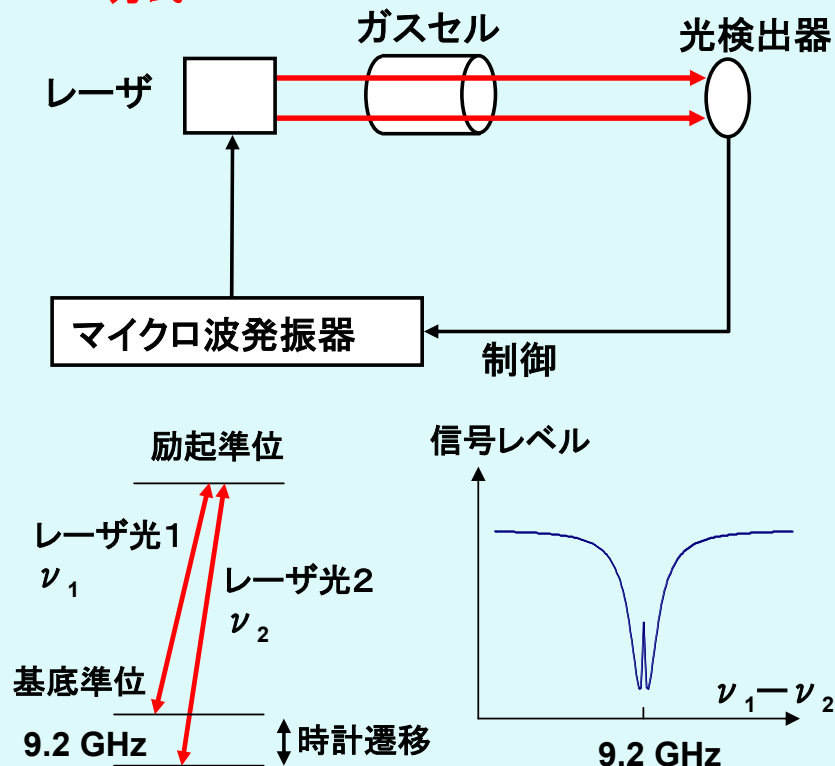
チップスケール原子時計(NIST)^[1]



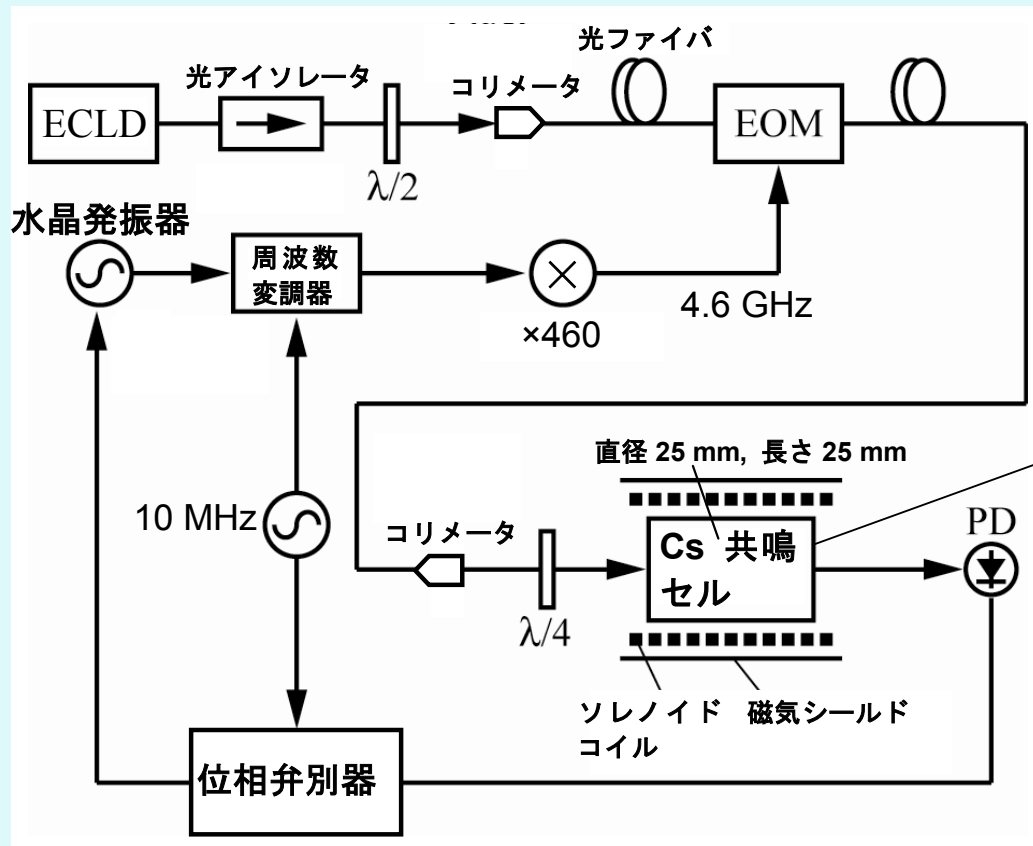
米国標準技術研究所(NIST)ではレーザ、セル、光検出器、光学部品を集積化してミリメートルサイズを実現。

[1] S. Knappe et al., "A microfabricated atomic clock," Appl. Phys. Lett., vol. 85, pp. 1460-1462 (2004).

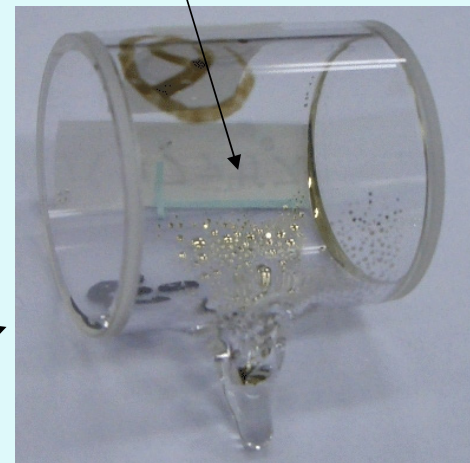
CPT方式



CPT法を用いた小型Cs光原子時計



10 Torr の窒素バッファガス封入



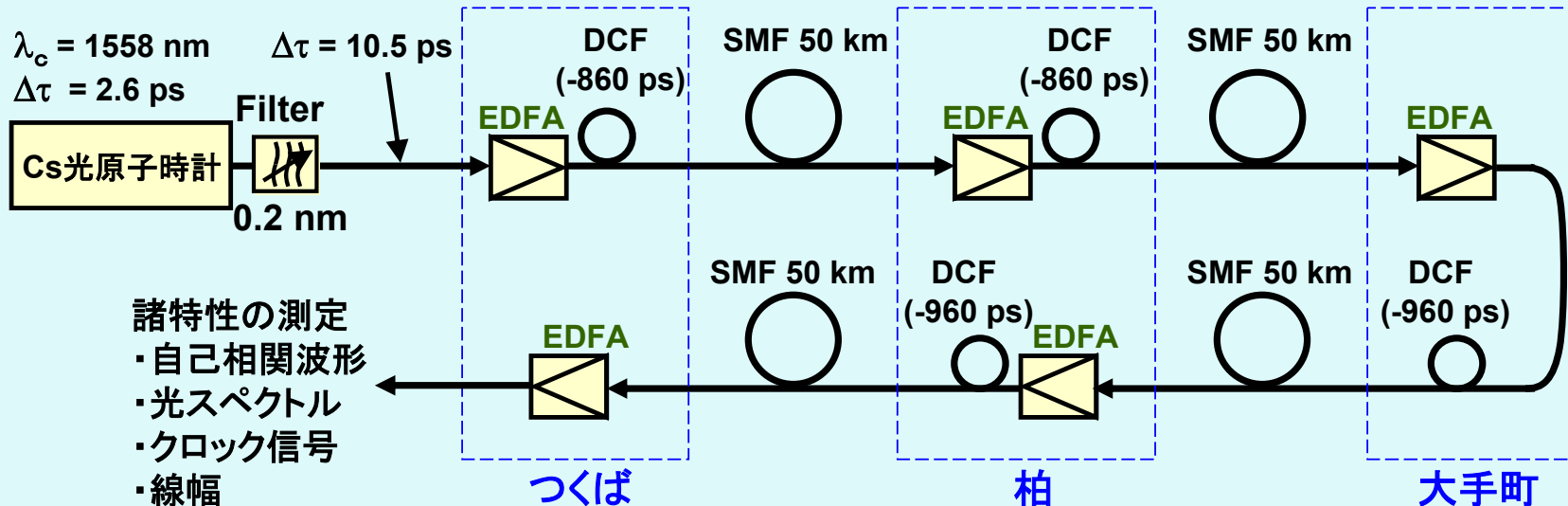
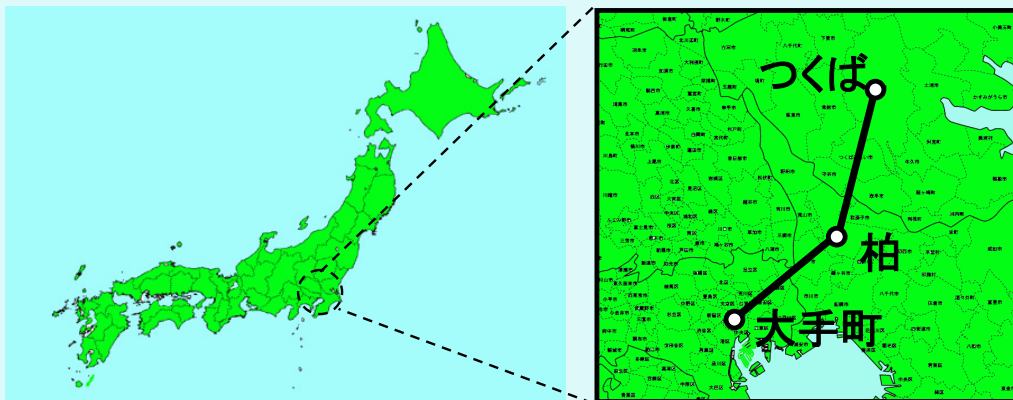
Csガスセルの写真

(セルに付着したCs原子(金色部)の一部が蒸発し、Csガスセルを形成している。)

周波数安定度の評価

周波数安定度として平均時間1秒で 1×10^{-10} 、10 秒で 2×10^{-11} が得られた。
(目標数値: 1×10^{-11})

(3) Cs光時計の出力光クロック信号の光ファイバ配信実験



JGN II 光ファイバ伝送路(つくばー大手町間往復200 km)

本研究における論文発表・受賞など

■ 論文発表 13件

- [1] M. Yakabe, K. Nito, M. Yoshida, M. Nakazawa, Y. Koga, K. Hagimoto, and T. Ikegami, “Ultrastable cesium atomic clock with a 9.1926-GHz regeneratively mode-locked fiber laser,” Optics Letters, Vol. 30, No. 12, pp. 1512-1514 (2005).
- [2] T. Hirayama, M. Yoshida, M. Nakazawa, K. Hagimoto, and T. Ikegami, “A mode-locked laser-type optical atomic clock with an optically pumped Cs gas cell,” Optics Letters, Vol. 32, No. 10, pp. 1241-1243 (2007).
- [3] M. Yoshida, T. Hirayama, M. Nakazawa, K. Hagimoto, and T. Ikegami, “Regeneratively mode-locked fiber laser with a repetition rate stability of 4.9×10^{-15} using a hydrogen maser phase-locked loop,” Optics Letters, Vol. 32, No. 13, pp. 1827-1829 (2007).

■ 口頭発表 32件（内、招待講演3件）

- [1] K. Watabe, T. Hirayama, T. Ikegami, K. Hagimoto, S. Ohshima, M. Yoshida, and M. Nakazawa, “Characteristics of Coherent Population Trapping Signals of Cs-D1 and Cs-D2 Lines,” Asia pacific Time and Frequency Workshop (ATF-2006), New Delhi, India (2006).
- [2] M. Nakazawa, “Ultrahigh-speed fiber laser and its application to optical metrology,” Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2006), Invited paper, Long Beach, USA (2006).
- [3] T. Hirayama, M. Yoshida, M. Nakazawa, K. Hagimoto, and T. Ikegami, “An ultrastable Cs optical atomic clock with a regeneratively mode-locked fiber laser and an optically pumped Cs gas cell,” Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2007), Postdeadline Paper, CPDB11, Baltimore, USA (2007).

■ 受賞6件

- [1] M. Nakazawa, R. W. Wood Prize, “For inventing the 1.48 μm InGaAsP laser-diode-pumped erbium-doped fiber amplifier and the development of its application to high-speed optical communications and short pulse lasers,” 2005年5月25日
- [2] T. Hirayama, IQEC/CLEO-PR 2005 Best Student Paper Award, “An ultrastable Cs optical atomic clock with a 9.1926-GHz low-drift regeneratively mode-locked fiber laser,” 2005年7月14日.
- [3] K. Osawa, IEEE Sendai Section Student Award 2006 The Best Paper Prize, “Fiber transmission of microwave and optical standard signals using a mode-locked fiber laser in the GHz region,” 2006年12月7日.

まとめ

- (1) 光マイクロ波発振器とCs二重共鳴セルを組み合わせた超高安定なCs光時計をラックマウントサイズで実現することに世界で初めて成功した。

周波数安定度: $1.2 \times 10^{-12} @ \tau=1 \text{ s}$, $8.8 \times 10^{-14} @ \tau=100 \text{ s}$ (目標数値: $10^{-12} \sim 10^{-13}$)

- (2) CPT法を用いた小型Cs共鳴セルを開発し、本セルを用いたCs光時計の基本動作実験に成功した。

周波数安定度: $1 \times 10^{-10} @ \tau=1 \text{ s}$, $2 \times 10^{-11} @ \tau=10 \text{ s}$ (目標数値: 1×10^{-11})

- (3) JGN II 光ファイバネットワーク(つくばー大手町間往復200 km)および実験室内に配置した225 km、525 kmの光ファイバ伝送路を用いて、Cs光時計の出力光パルス信号の光ファイバ配信実験を行なった(目標伝送距離: 500 km)。

その結果、伝送路中の偏波モード分散がクロック信号の劣化の主要因となることを新たに見い出した。