# 光で時を刻む新 Cs 原子 "光時計"の研究開発(052202004)

Development of Cs Optical Atomic Clock

## 研究代表者

### 中沢 正隆 東北大学電気通信研究所

Masataka Nakazawa, Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

#### 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<sup>†††</sup> 熊谷 芳宏<sup>†††</sup>

Masato Yoshida<sup>†</sup> Toshihiko Hirooka<sup>†</sup> Takeshi Ikegami<sup>††</sup> Ken Hagimoto<sup>††</sup> Ken-ichi Watabe<sup>††</sup> Rikihiro Iida<sup>†††</sup> Yoshihiro Kumagai<sup>†††</sup>

\*東北大学電気通信研究所 \*\*產業技術総合研究所 \*\*\*横河電機株式会社

<sup>†</sup>Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University <sup>††</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology <sup>†††</sup>Yokogawa Electric Corporation

**研究期間** 平成 17 年度~平成 19 年度

### 本研究開発の概要

本研究は高安定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 けて実現するものである。研究代表者等が提案してきた低ジッター光マイクロ波発振器を Cs 原子時計の心臓部となるオ シレータとして用いることにより、超高安定な光原子発振器を実現する。この装置は、Cs 共鳴線の周波数(9.1926 GHz) に等しい繰り返しの超短光パルスを発生できるため、光ネットワークを通じて世界中にこの超高安定標準信号を配信した り、次世代高精度光計測装置を実現することができる。また光ネットワークを情報伝達ばかりでなく、基準信号を供給す るといういわゆる"物理量伝送"が可能である事を示し、新光産業への道を切り開く。

#### Abstract

Our aim is to develop a new Cs optical atomic clock with a stable picosecond pulse laser (opto-microwave oscillator). By using our low-jitter opto-microwave oscillator as an oscillator in the Cs atomic clock, we realize an ultrastable optical atomic clock. As the Cs optical atomic clock directly emits an optical pulse train at 9.1926 GHz with the same stability as an atomic clock, we can deliver the ultrastable standard signal throughout the world via optical fiber networks.

## 1. まえがき

情報量の増加とともに通信ネットワークは高速かつ複 雑になり、我々の取り扱う信号の精度やクロックの安定性 の向上が一段と重要になっている。ネットワークは基準信 号に同期して動作しているが、その元になるのは Cs の原 子発振器である。しかし、Cs 原子発振器は 50 年近く前に 提案されたものであり、方式自体は旧式になりつつある。 特に、その中で用いられているオシレータは水晶発振器で あり、今日では水晶発振器より優れた性能の発振器が報告 されている。

本研究では高安定ピコ秒パルスレーザ(光マイクロ波発振器)をオシレータとして利用することにより、超高精度なマイクロ波と光パルスを同時に発生させる新 Cs 光原子発振器を実現する。これにより Cs 原子発振器の周波数安定度の向上、狭線幅のマイクロ波の発生、ならびに光パルス出力による高精度クロック信号の光ネットワーク配信など、新たな Cs 光時計技術を確立する。

#### 2. 研究内容及び成果

本研究では、2つのタイプのCs光時計を開発した。一つは高安定光マイクロ波発振器とCs原子の二重共鳴セルを用いたラックマウントサイズのCs光時計であり、もう一つはCPT(Coherent Population Trapping)法による小型Cs共鳴セルを用いたCs光時計である。さらに、作製したCs光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、ジッター、および周波数安定度の

変化について詳細に測定した。以下各項目に関する研究成 果を述べる。

## 2. 1 光マイクロ波発振器とCs 二重共鳴セルを用いた Cs 光時計の開発

本研究で開発した Cs 光時計の構成を図1に示す。本光時計は、オシレータとして用いる光マイクロ波発振器、周波数基準器である Cs 二重共鳴セル、その Cs 共鳴線にオ



図1 光マイクロ波発振器とCs二重共鳴セルを用いた ラックマウントサイズCs光時計の構成

シレータの発振周 波数をロックする ための周波数安定 化回路、Cs 光時計 から出力される 9.1926 GHz のクロ ック信号から1秒 の時間基準信号を ダウンコンバート 出力するための同 期信号生成回路、出 力された時間基準 信号を基に時刻を 表示する時刻表示 器より構成されて いる。その概観写真 を図 2 に示す。Cs 光時計を構成する 各装置筐体を1台 のラックに収納し、



幅 54 cm×奥行 63 cm×高さ 183 cm 図 2 Cs 光時計の概観写真

Cs 光時計をラックマウントサイズで実現した。作製した Cs 光時計の周波数安定度は、アラン偏差を用いて評価した結果、平均時間 1 秒で  $1.2 \times 10^{-12}$ 、100 秒で  $8.8 \times 10^{-14}$  であった(目標数値: $10^{-12} \sim 10^{-13}$ )。この安定度は産総研が所有する一次標準器と同程度であり、短期安定度に優れた超高安定な Cs 光時計を世界で初めて実現することに成功した。

## 2. 2 CPT 法による小型 Cs 共鳴セルを用いた Cs 光時 計の開発

本研究では 2.1 で述べた Cs 二重共鳴セルを用いた Cs 光時計と並行して、低コストで小型の Cs 光時計の実現を 目指し、CPT 法を用いた小型 Cs 共鳴セルの開発を行なっ た。CPT 法を用いた Cs 光時計の構成を図 3 に示す。10 Torr の窒素バッファガスを封入した直径 25 mm ¢ の小型 Cs 共鳴セルを作製し、CPT 法を用いてその Cs 共鳴線に 水晶発振器を安定化させた。ここで CPT 信号を検出する ために必要な 2 種類のレーザ光は、波長 894.6 nm (Cs-D1 線)の外部共振器型半導体レーザ (ECLD: External Cavity Laser Diode)の出力を導波路型電気光学変調器

(EOM: Electro- Optical Modulator)を用いて位相変調 することにより発生させている。本 Cs 光時計の周波数安 定度は、平均時間 1 秒で 1×10<sup>-10</sup>、10 秒で 2×10<sup>-11</sup>であっ た(目標数値:1×10<sup>-11</sup>)。現在の安定度は ECLD の AM および FM 雑音で制限されていると考えられる。今後、 より線幅の狭い光源を用いることにより更なる安定度の 改善が見込まれる。



図3 CPT 法を用いた Cs 光時計の構成

## 2. 3 Cs 光時計の出力光パルス信号の光ファイバ配信 実験

JGNⅡ光ファイバネットワーク(つくば―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、2.1 で述べた Cs 光原子時計 の出力光パルス信号 (クロック信号) の配信実験を行ない (目標伝送距離:500 km)、伝送に伴う高精度クロック信 号の SN 比、ジッター、および周波数安定度の変化につい て詳細に測定した。その結果、225 km の伝送距離ではク ロック信号の SN 比の劣化はみられず、また 525 km 伝送 後においても 70 dB 以上の高い SN 比が得られることが わかった。一方、クロック信号のジッター特性および周波 数安定度は伝送距離とともに劣化し、特に既設の JGNⅡ 伝送路においてはその劣化が顕著にみられた。具体的には、 JGN II 伝送路を配信したクロック信号のジッターは約 0.6 ps 増大し、さらにその周波数安定度は積分時間1秒に おいて $1 \times 10^{-12}$ から $5 \times 10^{-12}$ に劣化することがわかった。 偏波アナライザーによる偏波の詳細な測定の結果、この劣 化は光ファイバ伝送路における偏波モード分散に起因す ることを見出した。

## 3. むすび

本研究では光マイクロ波発振器とCs二重共鳴セルを用 いることにより超高安定なCs光原子時計をラックマウン トサイズで実現することに成功した。また、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 計の動作実証実験に成功した。さらに、作製したCs光時 計からの出力光パルス信号の光ファイバクロック配信実 験をJGNIIを利用して行ない、伝送路の偏波モード分散 がクロック信号の劣化の主要因となることを見出した。

## 【誌上発表リスト】

- 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 年 6 月 15 日)
- [2] M. Nakazawa, M. Yoshida, and T. Hirooka, "Ultra-stable regeneratively mode-locked laser as an opto-electronic microwave oscillator and its application to optical metrology," IEICE Transactions on Electronics, Invited paper, Vol. E90-C, No. 2, pp. 443-449, (2007 年 2 月 1 日)
- [3] 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 年 5 月 15 日)

## 【受賞リスト】

- [1] M. Nakazawa, R. W. Wood Prize, "For inventing the 1.48  $\mu$ m 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] M. Nakazawa, Thomson Scientific Laureate, "For development of erbium-doped fiber amplifiers, which have revolutionized high-speed fiber-optic communication networks worldwide," 2006 年 9 月 5 日 【本研究開発課題を掲載したホームページ】

http://www.nakazawa.riec.tohoku.ac.jp