

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820171

研究課題名(和文)長さ標準になった光コムを用いた計測現場用高精度校正システムの開発

研究課題名(英文)Development of length standard calibration system based on optical frequency comb

研究代表者

章 冬 (WEI, DONG)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70610418

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：2009年、日本における長さの国家標準がヘリウム・ネオンレーザーから光周波数コムに変わった。光周波数コムは光ファイバーを用いて、すべての長さ計測は光ファイバーを経由し、統一され、生産の高度化を推進できる。我々は、波長の代わりに、パルス繰返間隔長を用いた長さ計測について研究している。本研究は波長とパルス繰返間隔長の対称性から、パルス繰返間隔長を物差しとした2色法を提案した。両2色法を数字計算と光学実験により検証した。研究を通して、パルス繰返間隔長を物差しとした2色法の基本性能は従来にある波長による2色法とほぼ同じであることが分かった。光周波数コムを用いた絶対的な長さ計測に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：In 2009, the national standard of length in Japan was changed from the iodine-stabilized He-Ne laser to the femtosecond optical frequency comb (FOFC). Because the He-Ne laser is monochromatic light, its wavelength was used as a practical standard to realize the meter. On the other hand, FOFC is coherent polychromatic light. In addition to wavelength, FOFC contains another length unit, the adjacent pulse repetition interval length (APRIL), which is a coherent combination of multiple wavelengths. Instead of using wavelength, we have employed the APRIL as a standard and proposed an APRIL-based homodyne interferometer. As an alternative to the conventional two-color (that is, wavelength-based) length-measurement technique, we propose a two-color method based on the adjacent pulse repetition interval length (APRIL), the physical length associated with the pulse repetition period.

研究分野：精密計測

キーワード：光コム 長さ計測 長さ標準 長さ校正 パルス繰返間隔長 2色法 全地球測位システム 物差

### 1. 研究開始当初の背景

2009年、日本における長さの国家標準がヘリウム・ネオンレーザーからフェムト秒光周波数コム（以下では、光周波数コム）に変わった。光周波数コムの中心波長は1560 nmにある。通信用の光ファイバーのCバンド（1530~1565 nm、光ファイバーの光伝送損失が小さい波長帯）の中にある。このことから、光周波数コムは光ファイバーを用いて、必要なところに光信号を配信できるといえる。これは、すべての長さ計測は光ファイバーを経由し、統一され、生産の高度化を推進できる。このような高度な生産システムを構築するためには、送られた光周波数コム信号を用いた計測現場で簡便に利用できる実時間・高精度での測長器が必要である。

### 2. 研究の目的

光周波数コムから出た光パルス信号を用いて長さ計測を可能にする校正システム(図1)を開発することが本研究の目的である。

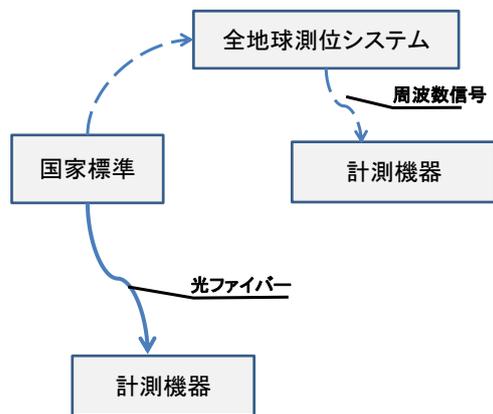


図1. タコ型トレーサビリティシステム

### 3. 研究の方法

本研究は波長とパルス繰返間隔長の対称性に注目している。ヘリウム・ネオンレーザーが単色光であるから、波長が長さの物差(つまり、メートル)の実現に使われた。光周波数コムはコヒーレントな多色光である。波長以外に複数の波長のコヒーレントな集合である「隣接したパルス繰返し間隔長」(以下：パルス繰返間隔長)という物差を持っている。

我々は、波長の代わりに、パルス繰返間隔長を用いた長さ計測について研究した。本研究は波長とパルス繰返間隔長の対称性から、パルス繰返間隔長を物差しとした2色法を提案した。両2色法を数字計算と光学実験により検証した。

### 4. 研究成果

#### (1) 光源の構築

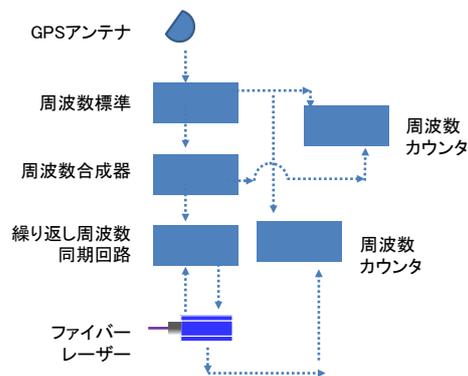


図2. 構築した光源の概略図

構成しているグローバル・ポジショニング・システム (Global Positioning System, GPS, 全地球測位システム) 信号にトレーサブルな光周波数コム光源の概略図を図2に示す。全地球測位システムアンテナ (Spectracom) で全地球測位システム信号を受信する。時間にもよるが、常に5~11個の衛星から信号を受けている。受信した全地球測位システム信号を全地球測位システム周波数標準 (Spectracom) に入力する。全地球測位システム周波数標準から出た信号 (10 MHz) を周波数カウンタ用と信号合成用に分ける。周波数カウンタ用の信号は周波数カウンタ (Spectracom) につなぐ。信号合成用の信号は周波数合成器 (ディエステクノロジー) に入力する。周波数合成器からは光周波数コムの繰返し周波数に近い周波数を発生させる。光周波数コムの繰返し周波数を周波数合成器から出た安定した周波数にロックさせる。このようにして、光周波数コムの繰返し周波数の安定化を実現する。

#### (2) 長さ計測の実現

研究を通して、パルス繰返間隔長を物差しとした2色法の基本性能は従来にある波長による2色法とほぼ同じであることが分かった。本研究は光周波数コムを用いた絶対的な長さ計測に貢献できることを期待する。

まず、研究の必要性について述べる。空気中の光計測において、空気屈折率の影響を受ける。真空中の長さに変換された値は比較可能な長さとなる。そのため、空気の屈折率を補正し、空気中で計測した長さを真空中の長さに変換する必要がある。経験式を用いて、空気の屈折率を温度、気圧、湿度、CO<sub>2</sub>濃度(これらを空気パラメータと呼ぶ)の関数として計算する。オープンな環境下における精密な空気パラメータ計測は困難である。空気の屈折率の波長依存性を利用して2波長(2色)で距離を測定し、屈折率の分布を補正する方法が提案されている[1]。最近では、 $1.4 \times 10^{-8}$ の相対精度で61メートルの長さを計測できたことが報告されている[2]。

次に、従来にある波長による2色法について紹介する。二点間の真の距離、真空中に置ける長さは幾何学的距離  $L_{vac}$  という。波長で

測った距離は光学的距離  $L_{air}(\lambda)$  という。両者の間につぎの関係がある。  

$$L_{vac\_i} = L_{air}(\lambda) / n_p(\lambda, T, P, H) \quad (1)$$

$$A_\lambda = \frac{[n_p(\lambda_2, T, P, H) - 1]}{[n_p(\lambda_2, T, P, H) - n_p(\lambda_1, T, P, H)]}$$
 上記の波長を用いた 2 色法を参考し、APRIL を用いた 2 色法[主な発表論文 3-5]は次のようになる。

$$L_{vac\_i} = L_{air}(\lambda_2) - A \times [L_{air}(\lambda_2) - L_{air}(\lambda_1)],$$

$$A_\lambda = \frac{[n_p(\lambda_2, T, P, H) - 1]}{[n_p(\lambda_2, T, P, H) - n_p(\lambda_1, T, P, H)]} \quad (1)$$

上記の波長を用いた 2 色法を参考し、APRIL を用いた 2 色法[主な発表論文 3-5]は次のようになる。

APRIL で測った距離は光学的距離  $L_{air}(\lambda)$  という。 $\lambda_{cen}$  はパルスの中心波長である。真空中に置ける長さとして測った光学的距離の間につぎの関係がある。  

$$L = L_{air}(\lambda) / n_g(\lambda, T, P, H)$$

$$L_{vac\_i} = L_{air}(\lambda_{cen\_2}) - A \times [L_{air}(\lambda_{cen\_2}) - L_{air}(\lambda_{cen\_1})],$$

$$A_\delta = \frac{[n_g(\lambda_{cen\_2}, T, P, H) - 1]}{[n_g(\lambda_{cen\_2}, T, P, H) - n_g(\lambda_{cen\_1}, T, P, H)]} \quad (2)$$
 同じ幾何学的距離を計測したとき、2つの中心波長のパルスで得られた光学的距離を用いて、幾何学的な距離を以下のように求められる。

$$L_{vac\_i} = L_{air}(\lambda_{cen\_2}) - A \times [L_{air}(\lambda_{cen\_2}) - L_{air}(\lambda_{cen\_1})],$$

$$A_\delta = \frac{[n_g(\lambda_{cen\_2}, T, P, H) - 1]}{[n_g(\lambda_{cen\_2}, T, P, H) - n_g(\lambda_{cen\_1}, T, P, H)]} \quad (2)$$

図 3 に温度変化により、両屈折率の変化及び設定した長さとして測った長さの差を示す。ここで、 $n_{sta}=1.000271374$ 。図 4 は気圧を変化する空気パラメータとして上記の計算を繰り返して得られた結果である。

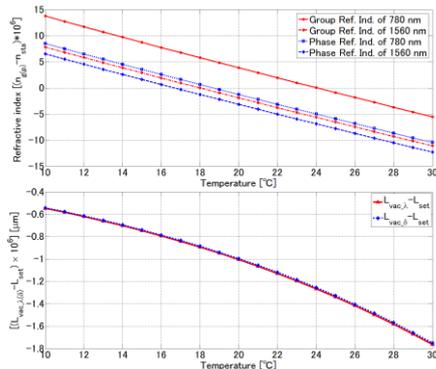


図 3. 温度が変化するとき、屈折率,  $L_{vac\_i}$  と  $L_{vac\_i}$  の変化量 (湿度 = 40 %).

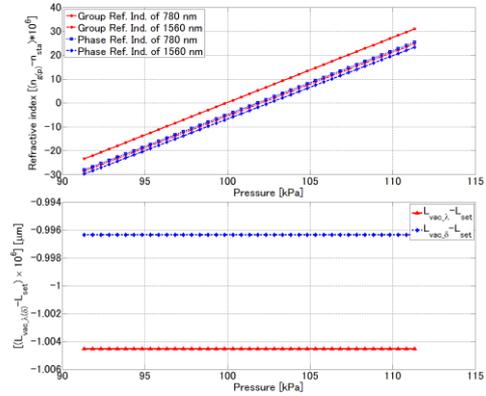


図 4. 気圧が変化するとき、屈折率,  $L_{vac\_i}$  and  $L_{vac\_i}$  の変化量 (湿度=40 %).

研究を通して、パルス繰返間隔長を物差しとした 2 色法の基本性能は従来にある波長による 2 色法とほぼ同じであることが分かった。

(3) 両物差の比較

表 1. 真空中においてスケールとして波長とパルス列繰返間隔長のアナロジー.

物差	波長	パルス列繰返間隔長
周波数パラメータとの関係	$\lambda_{vac\_p} = c_{vac} / f_p$	$\delta_{vac} = c_{vac} / f_{rep}$
不確かさ [主な発表論文 2]	$\frac{u(\lambda_{vac})}{\lambda_{vac}} = \frac{u(f_p)}{f_p}$	$\frac{u(\delta_{vac})}{\delta_{vac}} = \frac{u(f_{rep})}{f_{rep}}$
周波数パラメータの不確かさ [主な発表論文 2]	$u(f_p) / f_p = \frac{[u(f_{cen}) + P \times u(f_m)]}{(f_{cen} + P \times f_m)}$ $u(f_m) / f_m \approx u(f_c) / f_c$ $u(f_{cen}) / f_{cen} \approx [u(f_c) / f_c] \times (P \times f_m / f_{cen})$	$u(f_{rep}) / f_{rep} \approx u(f_c) / f_c$

表 2. 空気中においてスケールとして波長とパルス列繰返間隔長のアナロジー.

物差	波長	パルス列繰返間隔長
空気と真空との変換	$\lambda_{air} = \lambda_{vac} / n_p(\lambda_{vac})$	$\delta_{air} = \delta_{vac} / n_g(\lambda_{vac})$
不確かさ [主な発表論文 2]	$\frac{u(\lambda_{air})}{\lambda_{air}} \approx \frac{u(n_p(\lambda_{vac}))}{n_p(\lambda_{vac})}$	$\frac{u(\delta_{air})}{\delta_{air}} \approx \frac{u(n_g(\lambda_{vac}))}{n_g(\lambda_{vac})}$
屈折率	$n_p(\lambda_{vac}) = f(\lambda_{vac}, T, P, H)$	$n_g(\lambda_{vac}) = f(\lambda_{vac}, T, P, H)$
周波数パラメータの不確かさ	$\frac{u(\lambda_{air})}{\lambda_{air}} = \frac{u(f_c)}{f_c} = 10^{-11}$ (Assumption) $\frac{u(n_p(\lambda_{vac}))}{n_p(\lambda_{vac})} \approx 30 \times 10^{-9}$	$\frac{u(\delta_{air})}{\delta_{air}} = \frac{u(f_{rep})}{f_{rep}} = 10^{-11}$ (Assumption) $\frac{u(n_g(\lambda_{vac}))}{n_g(\lambda_{vac})} \approx 30 \times 10^{-9}$

[主な発表論文 2]で示した真空中、空気中及びに長さ計測においてスケールとして波長とパルス列繰返間隔長のアナロジーを表 1-3 に示す。これらのアナロジーを通して、パルス列繰返間隔長を物差しとして用いた絶対的な長さ計測に貢献できる。

表 3. 長さ計測においてスケールとして波長とパルス列繰返間隔長のアナロジー.

物差	波長	パルス列繰返間隔長
任意長さの表現	$L_w(t) = (M_s + N_s) \times \lambda_w(t)$ $= (M_s + N_s) \times \lambda_w / n_s(\lambda_w)$	$L_p(t) = (M_p + N_p) \times \delta_p(t)$ $= (M_p + N_p) \times \delta_p / n_p(\lambda_{p,ref})$
パラメータの決定	位相値、フリンジの山または谷	包絡線のピーク値
解像度	0.1 nm $< \lambda_w / 1000$	0.3 nm
物差の大きさ	[400, 1700] nm	[0.3, 7.5] m
物差の曖昧性	$\lambda_w / 4$	$\delta_p(t) / 4$

<参考文献>

- ① P. L. Bender and J. C. Owens, "Correction of Optical Distance Measurements for the Fluctuating Atmospheric Index of Refraction," J. Geophys. Res. 70, 2461-2462 (1965).
- ② G. Wu, M. Takahashi, K. Arai, H. Inaba, and K. Minoshima, "Extremely high-accuracy correction of air refractive index using two-colour optical frequency combs," Sci. Rep. 3(2013).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① D. Wei and M. Aketagawa, "Characteristics of an adjacent pulse repetition interval length as a scale for length," Optical Engineering, 査読有, 53(5), 051502-051502 (2013)  
DOI: 10.1117/1.OE.53.5.051502
- ② D. Wei and M. Aketagawa "Comparison of length measurements provided by a femtosecond optical frequency comb," Optics Express, 査読有, 22(6), 7040-7045 (2014)  
DOI: 10.1364/oe.22.007040
- ③ D. Wei, M. Aketagawa, K. Takamasu and H. Matsumoto, "Two-color absolute length measuring method based on pulse repetition interval lengths," Optical Engineering, 査読有, 53(12), 122413 (2014)  
DOI: 10.1117/1.OE.53.12.122413
- ④ D. Wei and M. Aketagawa, "Comparison of two-color methods based on wavelength and adjacent pulse repetition interval length," Journal of the European Optical Society - Rapid publications, 査読有, Vol 9

14031 (2014)

DOI: 10.2971/jeos.2014.14031

- ⑤ D. Wei and M. Aketagawa, "Analysis of the second harmonic generation of a femtosecond optical frequency comb," Optical Engineering, 査読有, 53(12), 122604-122604 (2014)  
DOI: 10.1117/1.OE.53.12.122604
- [学会発表] (計 9 件)
- ① 韋冬, 高増潔 and 松本弘一, "隣接したパルス列繰返し長を用いた長さ計測—新たな物差しを求めて—," in 光計測シンポジウム 2013 論文集, pp. 35-38, 日本光学測定機工業会, 東京ビックサイト (2013).
  - ② D. Wei, K. Takamasu and H. Matsumoto, "Length Traceability using Optical Frequency Comb," in 5rd International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN), p. P116, Taipei, Taiwan (2013).
  - ③ 韋冬, 高増潔, 松本弘一 and 明田川正人, "フェムト秒光周波数コムの隣接したパルス繰返し間隔長を用いた長さ計測 (第1報) —隣接したパルス繰返し間隔長による長さ計測精度の見積もり—," in 2013 年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp. 63-64, 関西大学 大阪 (2013).
  - ④ 韋冬 and 明田川正人, "長さの物差しに使われる隣接するパルス繰返し間隔長," in 第74回応用物理学会秋季講演会論文集, pp. 03-043, 同志社大学, 京都 (2013).
  - ⑤ 韋冬 and 明田川正人, "光周波数コムが提供する物差," in 第75回応用物理学会秋季講演会論文集, pp. 03-314, 北海道大学, 北海道 (2014).
  - ⑥ 韋冬 and 明田川正人, "2色法の特異性評価—数値計算—," in 日本光学会 Optics and Photonics Japan 2014 講演予稿集, p. 7pP10, 筑波大学東京キャンパス文京校舎, 東京 (2014).
  - ⑦ 韋冬 and 明田川正人, "GPS 制御周波数標準にトレーサブルな長さ計測," in 光計測シンポジウム 2014 論文集, pp. 14-17, 日本光学測定機工業会, 機械振興会館, 東京 (2014).
  - ⑧ D. Wei and M. Aketagawa, "Correction of group refraction index based on

pulse trains interference," in The International Conference on Photonics and Optical Engineering (icPOE 2014) A. T. A. A. W. L. C. Zhang, Ed., p. 944909, SPIE - the international society for optics and photonics, Xi'an, China (2015).

- ⑨ D. Wei and M. Aketagawa, "Correction of refraction index based on adjacent pulse repetition interval lengths," in Proc. SPIE 9276, Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications III S. H. T. Y. S. Zhang, Ed., pp. 92761C-92761C-92766, SPIE, Beijing, China (2014).

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

[http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~picotech/achievement\\_fund2.html](http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~picotech/achievement_fund2.html)

<http://souran.nagaokaut.ac.jp/view?l=ja&u=100000303&a2=0000013&a3=0000032&sm=affiliation&sl=ja&sp=1>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

韋 冬 (WEI, Dong)

長岡技術科学大学・工学部機械系・助教

研究者番号：70610418

### (2) 研究分担者

該当なし ( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

明田川 正人 (AKETAGAWA, Masato)

長岡技術科学大学・大学院工学研究科機械

創造工学専攻・教授

研究者番号：10231854