

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360039

研究課題名（和文）光コムを用いたカスケード型コヒーレントリンクによる  
サブ波長精度の絶対距離計の研究研究課題名（英文）Study on absolute distance measurements of sub-wavelength accuracy  
using cascaded coherent link with optical combs

研究代表者

美濃島 薫（MINOSHIMA KAORU）

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究室付

研究者番号：20358112

研究成果の概要（和文）：安定で高品位なファイバレーザーによる光コムを用いた、電波、テラヘルツ波から光波までのダイナミックレンジの広い絶対周波数基準を構築し、周波数軸と時間軸の位相やタイミングを自在に操作する手法を開発した。また、それらの手法を用いて、多段スケールに及ぶ種々の距離計測技術を開発するとともに、異なる領域の距離測定技術間のコヒーレントリンクを実証し、距離測定におけるダイナミックレンジ拡大の原理を示した。

研究成果の概要（英文）：We developed novel methods for controlling frequency, phase and timing of wide-range of frequency sources, such as from RF, THz, to optical frequencies using optical frequency combs based on mode-locked fiber lasers. Using developed techniques, we demonstrated several types of length measurements, together with a link between the results of an absolute distance measurement and an interferometric measurement to show the principle of widening the range in high-accuracy length measurements.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2010年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2011年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：光コム、超短パルスレーザー、ファイバレーザー、距離計測、干渉計測、光センサー

## 1. 研究開始当初の背景

光を用いた高精度な距離測定技術には、主として下記の2つのカテゴリーがある。

・「干渉計」：CWレーザーの光波の位相を測定。ナノメートルの不確かさが可能だが、レーザー波長（マイクロメートル程度）以上の範囲は位相の周期性のため特定（絶対測定）できない。

・「距離計」：強度変調波の位相を電氣的に測定（変調距離計）。変調波長は数m以上と大きく、長距離（キロメートルなど）絶対測定が可能だが、精度は一般にミリメートル程度。このように、2つの手法には、カバーする測定レンジにギャップ（サブ $\mu\text{m}$ ～mm）があった。

一方、光コムは周波数標準に同期して、高精度な多数の光周波数列を生成する光源で

あり、同時に、その周波数ビートとして高精度な多数の電波領域の周波数列 (RF コム) を生成する。つまり、光コムを用いることで、光の波長オーダーから数メートルの、絶対値が付与され互いに位相同期した可変長の光のものさしを生成することができる。

これまでに研究代表者らはコム技術を用いた高精度距離計 (コム距離計) を開発し、RF コムの複数のモードを用いて「距離計」の不確かさをマイクロメートル領域に低減化することに成功した。さらに「干渉計」でも、高精度な光コムの光周波数モードにより、連続変位については、ピコメートルの不確かさでマイクロメートルの範囲が測定された。このように、光コムの長くて正確な1本の「光のものさし」の上で、長距離側と短距離側の技術が接近してきた。そこで本研究では、光コムを用いて両者の中間領域をカバーする距離測定技術を開発するとともに、複数領域の距離測定技術、1本の光コムの絶対ものさしを基準としてカスケード的にコヒーレントリンクする技術原理を開発する。

光コム技術は20世紀末に出現し、革命的に発展して2005年にはノーベル物理学賞が授与されている。我々は光コム技術を長さ計測へと世界に先駆けて応用してきており、中でもコム距離計は「バイオニア的研究」として内外から注目されている。

さらに、これまでコム光源として主として用いられてきたチタンサファイアレーザーは、高精度だが大型でスキルを要するため、実用的でアイセーフ波長のエルビウム添加ファイバレーザーが注目されている。我々は、ファイバレーザーによる光コム (ファイバコム) においても、世界初の光周波数計測や長時間動作を実証している。

## 2. 研究の目的

安定で高品位なファイバレーザーによる光コム (楕型の光周波数モード列) を用いた、マイクロ波から光周波数までのダイナミックレンジの広い絶対周波数基準を構築し、周波数軸とそのフーリエ変換の関係にある時間軸の位相やタイミングを自在に操作する光波形シンセサイザを構築する。それを用いて、異なる測定範囲と精度を有する長さ計測技術をカスケードし、コヒーレントリンクの実現によってダイナミックレンジを画期的に拡大する手法を開発する。これらにより、原理的に光波長以下の精度でキロメートル程度の距離に適用可能な、任意の長さを高精度に絶対測定する技術原理を実証する。

## 3. 研究の方法

上記の研究目的達成のために、以下の研究項

目を実施した。

### (1) 高繰り返し・高出力モード同期ファイバレーザーによる高品位光コムの開発

エルビウム添加モード同期ファイバレーザーにおいて、高繰り返し化、モードフィルタリング、光増幅によって、各周波数モード強度の増大を行い、周波数制御の高品位化を行う。基準周波数に対して制御を高精度化し、低ノイズ化によって、絶対値の付与された高品位な光コムを発生する。

### (2) 光コムの高精度同期による高精度光波形シンセサイザの実現

2台のファイバレーザーによる光コムを高精度に同期する技術を開発する。両者の繰り返し周波数を相互に変化させ、同期制御と非同期制御を実現し、光波形シンセサイザを構築する。さらに、開発装置の応用可能性を評価するため、テラヘルツ領域のシンセサイザに拡張し、その基本特性を評価する。

### (3) 光コムを用いた距離測定技術の開発

開発したファイバレーザーによる光コムと、周波数・時間軸の制御手法を用いて、多レンジの距離測定技術を開発する。ファイバ光学系を用いて、光波干渉計と距離計を高精度にマッチングさせて構築し、本原理による距離測定性能を評価する。

## 4. 研究成果

### (1) ファイバコムの高繰り返し化

光コムは光周波数測定の基準のみならず、位相同期された多数の光周波数モードを、高精度な単一周波数の光源として利用できれば多くの応用分野が開ける。しかし、広く用いられているファイバコムにおいては、モード間隔が100 MHz程度と狭いため、光学的フィルタ等によって単一の光周波数モードを選別する事は困難である。

また、光コムを光検出器によって検出すると、モード間ビートによりRF周波数信号列 (RFコム) が発生し、高精度、低ノイズな周波数絶対値の付与された多数のRF信号源として利用できる。周波数制御などビート信号の1成分を利用する応用では、電気的フィルタで目的の周波数成分を選別するが、利用されない多数の光周波数モードによる検出器の飽和が問題になる。飽和はビート信号のS/N比を低下させるとともに、時間応答を歪め、高周波特性の劣化につながる可能性がある。

これらの課題解決のため、近年モード同期

ファイバレーザーの高繰り返し化が盛んに行われている。しかし、共振器構成上の制限に加え、パルスエネルギーの低下によって、モード同期の安定性を損なうと同時に応用性を制限する恐れがあり、レーザー共振器を直接高繰り返し化するのには限度がある。

本研究では、繰り返し周波数 50 MHz のモード同期ファイバレーザーにおいて、ファブリー・ペロー (FP) 共振器による光コムモードフィルタリングを行い、1.5 GHz 間隔の光コムの生成を行った。広帯域光では、FP 共振器のミラー分散によるスペクトル狭窄化の問題がある。加えて、一般的な空間共振器においては、空気ゆらぎや機械的不安定性の影響を抑える事が実験上の課題である。これに対して、ミラーの最適化、制御の高速化やファイバー体型 FP 共振器の開発によりこれらの課題を解決し、柔軟で実用性のある高繰り返し化光コムシステムの開発を行った。

その結果、モード間ビートの RF スペクトルにおいて 1.5GHz の主要モードに対して隣接モードを 30 dB 抑制したフィルタリングを実現し、検出器の飽和抑制により 26 dB の信号増強と SN 比向上を実現した(図 1)。加えて、さらなるフィルタリング性能の向上を図り、FP 共振器を 2 回透過させるダブルパスシステムを構築し、隣接モードの 56dB 抑制を得た。

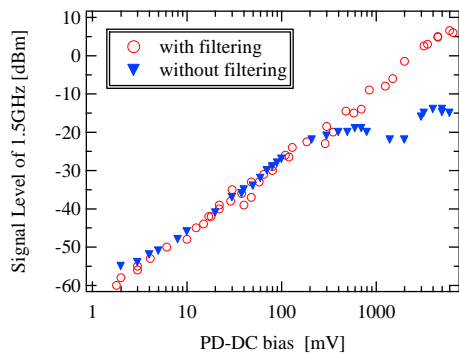


図 1. 光コムのモードフィルタリングによる飽和抑制

次に、FP 共振器によるコムのモードフィルタリングにより間隔周波数を高め、受光器が発生するマイクロ波信号の相対安定度を評価した。これまで、光コムを用いた光-マイクロ波周波数リンクにおけるコムの相対周波数安定度は①繰り返し周波数 ( $f_{rep}$ ) の合成② $f_{rep}$  の位相同期③ $f_{rep}$  の受光器での検出、による付加/残余位相雑音で制限されていることがわかっている。ここでは高安定レーザーをコムの基準とし、高安定レーザーにロックされたコムを FP 共振器でモードフィルタリングした上で、抜き出されたコム・モード間隔の周波数測定を行った。結果を図 2 に示すが、相対周波数安定度の向上は見られなかった。原因としては VCO の位相雑音や FP の分

散、制御帯域の不足などが考えられるが、世界的にも、モードフィルタリングによる相対周波数安定度の報告は初めてである。

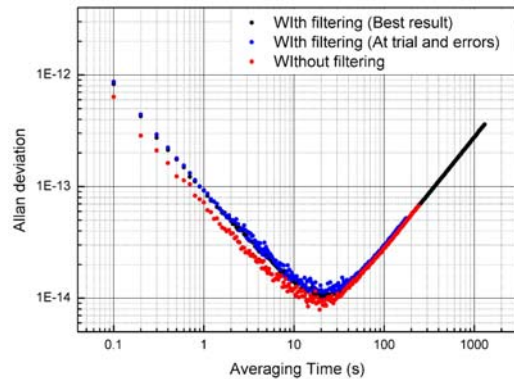


図 2. 光コムの相対周波数安定度。赤は繰り返し周波数の基本波を測定した時のもので、青と黒はフィルタリングを行った時のもの。

### (3) 光波形シンセサイザの開発とテラヘルツ領域への拡大

光コムに CW レーザーを同期し、コム間隔を走査することにより、光領域において 1 THz の連続周波数走査が可能な光シンセサイザを開発した。さらに、この技術をテラヘルツ波領域に適用し、任意かつ正確に値付けされた絶対周波数を出力可能なテラヘルツ・シンセサイザを開発した。2 台の光シンセサイザの光周波数差を 120 GHz 程度に調節し、両者の出力光を単一走行キャリア・フォトダイオード (UTC-PD) でフォトミキシングすることにより位相同期された周波数可変 CW-THz 波を発生させ、研究分担者らのグループで開発したテラヘルツコム参照型スペクトラムアナライザ (テラヘルツ・スペアナ) で絶対周波数計測を行った。

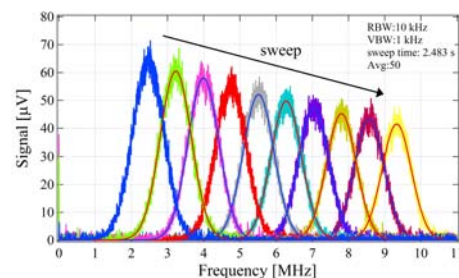


図 3. 光コムに同期した CW-THz 波の連続周波数走査

水素レーザーに安定化された 2 台の光シンセサイザを光周波数走査光源 (光周波数走査可能範囲 1 THz) および光周波数固定光源としてそれぞれ使い、両光源の出力を UTC-PD (周波数=90~140 GHz) でフォトミキシングすることにより CW-THz 波を発生させた。THz スペアナで測定した CW-THz 波の周波数およ

び CW レーザーの差周波数の差は数十 MHz にあたり、相対精度として  $2.5 \times 10^{-4}$  であった。この精度は、CW-THz 波の線幅が 1 MHz と広いことにより支配されている。

一方、CW-THz 波の 10 MHz に渡る連続周波数走査を実証した(図 3)。走査中の CW-THz 波の決定精度も  $5.8 \times 10^{-4}$  であり、無走査時の周波数決定精度と同程度であった。連続走査可能な領域は、検出系のエレクトロニクスの帯域で決定されており、断続的に CW-THz 波の 1.2 GHz に渡る連続周波数走査も示すことができた。光シンセサイザの連続走査帯域は 110 GHz に及んでおり、検出系の改良により、CW-THz 波においても、同程度の広帯域な連続周波数走査が可能と考えられる。

#### (4) 2 台の光コム相互相関による距離測定

パルス光の伝搬時間と光速から距離を算出する time-of-flight 法において、フェムト秒レーザー光(光コム)を利用できると、パルス幅狭窄化による距離分解能の大幅な向上が期待できる。しかし、フェムト秒パルス光の時間波形の計測には、通常の光検出器では応答速度が不十分なため、SHG(第 2 高調波発生光)相関計測を利用する必要がある。これにより正確な時間波形が計測可能になるが、機械式時間遅延走査が必要なため実時間測定できないという課題があった。

本研究では、2 台のフェムト秒パルスレーザー間のタイミングを自在に操作可能なデュアル光波形シンセサイザを構築し、time-of-flight 法に導入することにより、距離計測の高精度化と実時間化を試みた。ここでは、ルビジウム原子時計を基準信号源とした精密レーザー制御システムにより、2 台の光コムの繰り返し周波数が厳密に 10 Hz だけ異なるようにレーザー制御を行った。その結果、フェムト秒オーダーの時間波形をマイクロ秒オーダーまで時間スケール拡大して高速サンプリングすることが可能になり、汎用オシロスコープを用いた実時間測定(測定レート 10 Hz)が可能になった。また、今回の実験装置で取得されたパルス幅は 220 fs であり、これは  $66 \mu\text{m}$  の距離分解能に相当する。

次に、測定対象に既知の移動量を自動ステージで与えた場合の time-of-flight 法による測定値との比較を図 4(a)に示す。両者の間に良好な線形性が得られており、既知移動量と測定量の誤差は  $500 \mu\text{m}$  以下であった(図 4(b))。次に、測定対象の距離を固定した状態で、繰り返し測定を行ったところ、測定値の標準偏差は  $25 \mu\text{m}$  以下となり、良好な測定再現性が得られた。これらの距離計測の性能は、デュアル光波形シンセサイザのタイミングジッター(300 fs 以下)により制限されて

いると考えられ、タイミングジッターの抑制により更なる高性能化が期待できる。

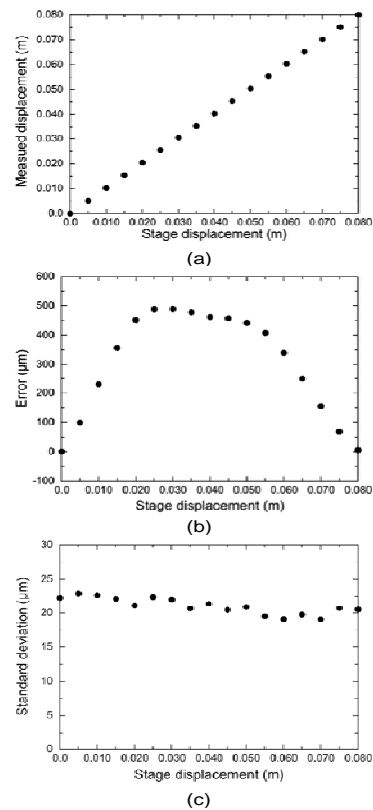


図 4. デュアル光波形シンセサイザを用いた距離計測の実験結果

#### (5) 1 台の光コムからのフィルタリングによる相互ビートを用いた距離測定

本研究によって開発したモード同期ファイバレーザーによる光コムにおいて、モードどうしのコヒーレンスを生かして干渉位相信号を生成し、距離信号の高分解能・高精度な検出手段を開発した。

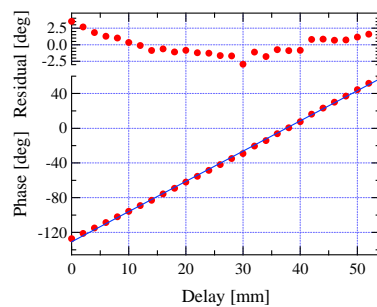


図 5. 2 つの RF コムのヘテロダインによる距離測定

距離測定の高分解能化・高精度化の為には測定周波数の高周波化が必要だが、検出エレクトロニクスの高速化が限界要因となる。モードフィルタリングしたコムを用いる事で、

1 台の光コム光源を用いた RF コムの多周波ヘテロダイナミクスが可能になり、検出器の制限が大きく緩和される。干渉(ビート)位相信号検出の高精度化のために、コム間隔周波数を制御して、高周波ビート信号を低周波数にビートダウンして検出する手法を開発した。ここでは、周波数 1.45 GHz における位相信号を、ビートダウンにより周波数 150 MHz において検出できた。実際に測定光路長を変化させて、本手法による位相検出の原理確認を行い、距離信号の取得を確認した(図 5)。測定周波数のさらなる高周波化が実現すれば、例えば 105 GHz の信号情報を 3.5 GHz のビート信号により観測することも可能となり、距離測定の画期的な高精度化が期待される。

#### (6) コヒーレントリンク原理の実証

開発したエルビウム添加モード同期ファイバレーザーによる光コムと、同一波長 1.5  $\mu\text{m}$  帯の CW レーザーを用いて、モード間ビートによる変調周波数を用いた距離計と光波干渉計とを同一の光学系によって構築し、2 種のレンジの異なる距離測定法におけるコヒーレントリンクの原理を実証した。

実験装置は、ファイバコム、CW レーザー、距離センサー光学系、位相検出電気系の 4 つの部分から成り、それらは、シングルモードファイバによって結合されている。光源のファイバコムと CW レーザーをファイバスイッチによって切り替えて、距離測定と光波干渉計測定を切り替えて行う。2 つの光源は、同一のシングルモードファイバに入力され、波面は完全に一致しているため、2 種の測定の切り替えによって空間的アライメントの不完全性を起因とした誤差要因は生じない。

コムのモード間ビートを用いた距離測定においては、測定周波数  $f = 39.969$  GHz を用い、発振器とのヘテロダイナミクスを用いて、10 MHz において位相測定を行った。

距離センサー光学系においては、ビームを分離し、測定光路と同時に参照光路を設け、距離の絶対基準と同時に、エレクトロニクスの不安定性や光量変動を補正する基準として用いた。モード間ビートによる距離測定においては、測定光路と参照光路をシャッタによって交互に切り替え、干渉測定においては両光路を同時に用いて干渉信号を生成した。

まず、構築したモード間ビートを用いた距離計の安定性を評価した。その結果、5000 秒間の変動の標準偏差が 230 nm (距離 0.3 m) であり、空気揺らぎによる不安定性の影響が大きい距離 10 m においても 490 nm であった(図 6)。次に、実際に、ターゲットの位置を変化させながら、距離計と干渉計測定の比較を行った。ビート周波数(約 40 GHz)の半波長(位相の 1 周期)にあたる 3.75 mm の変位

を近距離のターゲットに独立に 4 回与え、比較を行った。この変位量は干渉縞 4840 個に相当するが、両者の測定値の差は、4 回の平均値で 20 nm、標準偏差 60 nm であった。最後に、ターゲットの距離を 1 m に増加させ、3.75 mm を積算 4 回、計 19 mm の変位を与えた。5 セットの測定結果は、両者の測定値の差が平均 330 nm、標準偏差 470 nm となった。これには空気揺らぎの影響が含まれている。

これらの差は、干渉計の 1 フリンジ(波長の 1/2)より小さな値であり、距離計による絶対値測定によって干渉縞の整数次が特定できることになる。すなわち、異なる領域の測定がコヒーレントにリンクできることが示された。これにより、干渉計測定のフリンジの繰り返しによる曖昧さを回避できることになり、干渉計の位相測定精度を生かした絶対測定が実現できることになる。

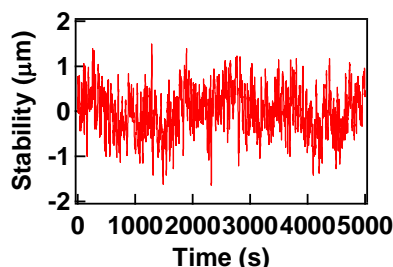


図 6. 光コムのモード間ビートによる距離測定の安定性

以上のように、本研究により、光コムを用いて、電波からテラヘルツ波、光波までの広い領域において、周波数軸、時間軸のパラメータを高精度かつ自在に操作する手法を開発した。また、それらの手法を用いて、多段スケールに及ぶ種々の距離計測技術を開発するとともに、それらの異なる領域の技術がコヒーレントにリンクすることを示した。これらを実用的なファイバコムによって実現したことも大きな特長である。

本研究で開発した広ダイナミックレンジの距離計測技術は、3 次元座標測定などの産業測定分野において絶対距離測定を可能にし、産業効率化に寄与できる。さらに、大気の影響がない真空中の測定においては究極のダイナミックレンジを実現できる可能性があり、宇宙科学技術や地殻変動の精密モニタにおいて強力なツールとして期待される。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 11 件)

① T. Yasui, H. Takahashi, K. Kawamoto, Y. Iwamoto, K. Arai, T. Araki, H. Inaba, and K. Minoshima, Widely and continuously tunable terahertz synthesizer traceable to a microwave frequency standard, Opt.

Express, 査読有, Vol. 19, 2011, pp. 4428~4437, DOI: 10.1364/OE.19.004428

② T. Yasui, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, T. Nagatsuma, and T. Araki, Terahertz Frequency Metrology Based on Frequency Comb, IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONIC., 査読有, Vol. 17, 2011, pp. 191 ~ 201, DOI: 10.1109/JSTQE.2010.2047099

③ K. Minoshima, H. Inaba, Precise length metrology using fiber-based frequency combs, Proc. Optical Sensors, 査読無, 2010, CD-ROM, <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=Sensors-2010-STuB1>

④ T. Yasui, M. Nose, A. Ihara, K. Kawamoto, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, and T. Araki, Fiber-based, hybrid terahertz spectrometer using dual fiber combs, Opt. Lett., 査読有, 35, 2010, pp. 1689~1691, DOI: 10.1364/OL.35.001689

⑤ T. Yasui, H. Takahashi, Y. Iwamoto, H. Inaba, and K. Minoshima, Continuously tunable, phase-locked, continuous-wave terahertz generator based on photomixing of two continuous-wave lasers locked to two independent optical combs, J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 107, 2010, pp. 033111-1~7, DOI: 10.1063/1.3305324

⑥ T. Yasui, R. Nakamura, K. Kawamoto, A. Ihara, Y. Fujimoto, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, Real-time monitoring of continuous-wave terahertz radiation using a fiber-based, terahertz-comb-referenced spectrum analyzer, Opt. Express, 査読有, Vol. 17, 2009, pp. 17034 ~ 17043, DOI: 10.1364/OE.17.017034

[学会発表] (計 28 件)

① 美濃島 薫, Wu Guan hao, 新井 薫, 鍛島 麻理子, 稲場 肇; 光コム: 時間・空間・周波数の超精密ものさし, 第 123 回微小光学研究会 (招待講演), 2012/3/1, 東海大学高輪 (東京都)

② 美濃島 薫, モード同期ファイバレーザーの光コムを用いた精密長さ測定, PST-net 特別講演会 (招待講演), 2012/2/24, 大田区産業プラザ (東京都)

③ 安井 武史, デュアル光コムを基準とした超精密テラヘルツ・シンセサイザーの開発, レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会 (招待講演), 2012/1/30, TKP 仙台カンファレンスセンター (宮城県)

④ Takeshi Yasui, How to measure THz frequencies with high precision, The 4th Japan-Korea Joint workshop on THz Technology (招待講演), 2011/12/19, 名古屋大学 (愛知県)

⑤ 美濃島 薫, フェムト秒光コムによる高精度

距離計測技術の展開, フェムト秒光技術の展開 (招待講演), 2011/11/22, 産総研 (茨城県)

⑥ 美濃島 薫, 光コムによる長さ計測, 第 36 回光学シンポジウム (招待講演), 2011/7/7, 東京大学生産研 (東京都)

⑦ Kaoru Minoshima, High accuracy length metrology using fiber-based optical frequency comb, ISMTII 2011 (基調講演), 2011/6/29, KAIST (Daejeon, 韓国)

⑧ K. Minoshima, K. Arai, H. Inaba, High Accuracy Length Metrology using Fiber-Based Optical Frequency Combs, ICOCN (招待講演), 2010/10/25, 南京, 中国

⑨ K. Minoshima, High-Precision Absolute Length Metrology using Fiber-Based Optical Frequency Comb, 2010 ICEAA (招待講演), 2010/9/21, Sydney, Australia

⑩ K. Minoshima, H. Inaba, Precise length metrology using fiber-based frequency combs, Optical Sensors (招待講演), 2010/6/21, Karlsruhe, Germany

⑪ 美濃島 薫, 光コムによる超高精度光計測, 日本光学会冬期講習会 (招待講演), 2010/01/21, 東京大学山上会館 (東京都)

⑫ 美濃島 薫, 光コムレーザー光源の進展と精密長さ計測技術への応用 (招待講演), 学術振興会第 130 委員会研究会, 2009/05/11, 東京理科大学 (東京都)

⑬ 美濃島 薫, フェムト秒光コムを用いた精密長さ計測 (招待講演), 精密工学会超精密位置決め専門委員会, 2009/04/24, 東京工業大学 (東京都)

[図書] (計 1 件)

① 美濃島 薫, 強光子場科学研究懇談会, 光科学研究の最前線 2 「超高速光計測」, 2009, pp. 27

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

美濃島 薫 (MINOSHIMA KAORU)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究室付

研究者番号: 20358112

### (2) 研究分担者

稲場 肇 (INABA HAJIME)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号: 70356492

安井 武史 (YASUI TAKESHI)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号: 70314408