

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：13102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630022

研究課題名(和文)ミラー間距離が不変な光共振器を用いた恒温恒“絶対空気屈折率”チャンバーの開発

研究課題名(英文)The development of optical chamber which can maintain temperature and absolute air refractive index using geometrical path compensation

研究代表者

明田川 正人(Masato, Aketagawa)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10231854

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)： 空気の絶対屈折率は、光路長を真空のときと常圧のときとで比較することで得ることが出来る。これは光路長(幾何学長)が真空でも常圧でも一定であることを要求する。10のマイナス10乗の相対精度で絶対屈折率を決定するには、もし光路長が1mの場合、光路長(幾何学長)変化が0.1nm以下であることを要求するのと同じである。本研究では、光学干渉計により、真空時と常圧時の幾何学長変化を捉えこれを能動的に補正するシステムを提案した。また、屈折率変化にともなう光路長変化を周波数から決定する手法に関し提案を行った。10nm程度の能動制御は確認できた。

研究成果の概要(英文)：The absolute air-refractive index can be determined by comparing optical path difference for the cases that the optical chamber is at vacuum or at normal pressure. But, for the comparison, the geometrical length change of the chamber must be kept within 0.1 nm for 1m geometrical length, if it is required that 10<sup>-10</sup> order precision. In this research, we have proposed an active compensation of the geometrical length change of the chamber using the optical interferometer. We have also proposed the use of frequency measurement for the detection of the optical path change. We succeeded 10nm order compensation with the proposed method.

研究分野：精密工学

キーワード：空気屈折率 幾何学長 光路長 能動制御 干渉計

1. 研究開始当初の背景

超微細加工の進展と加工寸法の大型化が進んでいる。1m以上の大寸法製品に全体加工精度 nm が要求されつつある。寸法保証は相対的でなく絶対的となり、メートル定義（光速度を介した周波数計測）に従う必要がある。光干渉計はメートル定義に従うが、空気屈折率×幾何学長を計測し、絶対幾何学長を決定するには屈折率変動が大きな問題である。温度圧力などから空気屈折率を $10^{-8}$ の精度で計算する方法(Edlen ら)が利用されるが、上の要求を満たさない。真空の空気絶対屈折率は1となるが、これはコスト・測定対象に問題があり、常圧下測定が望ましい。1m範囲で nm 精度を保証するには $10^{-9}$ 以下の精度をもつ常圧下での絶対空気屈折率測定あるいは安定化法が必要である。これに対し研究者は次の研究を研究開始当初に行っていた。

(研究1)メートル定義に準拠する**変位測定法**として、周波数可変レーザ、電気光学素子 EOM 及びロックイン検出による零位法を用いた位相変調ホモダイン干渉計を開発した。この干渉計において干渉縞の位相変化をレーザの周波数変化に変換し、変位を pm の分解能で決定し、商用のヘテロダイン干渉計の位相補間誤差を校正した(精密工学会誌, Vol.76, (2010), pp.673 : 2010 年度精密工学会・論文賞受賞)。

(研究2)極低熱膨張材で構成した光共振器(光干渉計)と EOM・周波数可変レーザ・ロックイン検出による零位法を用い**レーザの共鳴点追尾周波数変化から空気屈折率相対変動を $10^{-8} \sim 10^{-9}$ の不確かさで測定した**(Measurement Science & Technology, Vol. 20, (2009), 084019, Measurement Science & Technology, V. 20, (2009), 125302)。また、**空気の相対的屈折率変動を能動内圧制御により $10^{-9}$ 精度まで安定化する密閉チャンバーを製作した**(Applied Optics, Vol. 50, (2011), pp. 53-60)。

(研究3)光共振器に EOM で位相変調したレーザ光を導入し、キャリア周波数ピークの両脇に発生する多重サイドバンド間の干渉とロックイン検出による零位法を組み合わせ、**光共振器長を再も隣接した共鳴点間の周波数差(Free Spectral Range: FSR)から $10^{-8}$ から $10^{-9}$ の精度で決定した**(Measurement Science & Technology, Vol. 22, (2011), 035702 及び Int. J. Nanomanufacturing, Vol. 8, (2012), pp.23-30, 2012 年精密工学会春季大会講演論文集 F02)。

上の成果より、ミラー間幾何学長が圧力によらず $10^{-12}$ 精度で不変な光共振器が出来れば、常圧と真空中の FSR 測定比較により、絶対空気屈折率測定( $10^{-11}$ 精度)と安定化( $10^{-10}$ 精度)が可能なることを見いだした。

国内外の絶対空気屈折率測定の研究動向としては、1)圧力容器内に干渉計を組み、真空と常圧での干渉縞の移動から計算する

もの(米 NIST、スイス計量研など)、2)光コムを干渉計の光源に用いるもの(日本 NMIJ、韓国 KAIST など)などがあり、いずれも精度 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ を達成している。ただし、ミラー間幾何学長不変共振器や空気絶対屈折率能動制御を指向する研究はない。

2. 研究の目的

光干渉計はメートル定義に従うが、屈折率×幾何学長を計測し結果に屈折率の影響が入る。 $10^{-9}$ の屈折率誤差はメートル測定範囲でナノメートルの誤差を生む。常圧常温空气中で、メートル測定範囲をナノメートル精度で光干渉計により絶対幾何学長・形状計測することが本申請の最終的な目標である。次が目的である。

(目的1)真空から常圧へ内圧変動してもミラー間幾何学長を $10^{-12}$ 精度で不変とする密閉光共振器の開発。

(目的2)上のミラー間幾何学長不変光共振器を利用し、内部の絶対空気屈折率をメートル定義すなわち周波数計測により $10^{-11}$ 精度で計測する。さらに任意の絶対空気屈折率を保持・能動制御可能な恒温かつ恒“絶対屈折率”チャンバーを構築する。チャンバー内の絶対空気屈折率安定性 $10^{-10}$ 精度を目指す。

(目的3)上の(1)を利用し(2)で開発したチャンバー内に光干渉計を設置し空气中でも $10^{-9}$ 精度(メートル範囲でナノメートル精度)以下の絶対長さ・形状測定を可能にする。

3. 研究の方法

(1)内部圧力(真空～常圧)に関わらずそのミラー間幾何学長を $10^{-12}$ 精度で不変とする中空かつ密閉光共振器(以下では密閉幾何学長不変共振器と呼ぶ)の開発を行う。密閉容器にそれぞれ共振器ミラー2個(内面が高反射膜)と片側のミラーを変位させる直道案内・アクチュエータを取付ける。外側には高剛性極低熱膨張材料(線膨張率 $10^{-8}/K$ 以下)を構造部材とするメトロロジーフレームを設置しフレーム全体をサブ mK レベルで温度安定化を図る。フレームの熱・機械変形をサブ pm レベルまで抑制する。フレームに片側の共振器ミラーを固定するがもう片方のアクチュエータ付ミラーはフレームに変位を制約されない。共振器ミラーの2内面の外側反射光とフレームに取り付けた光学系でリング干渉計を構築し共振器ミラー変位計測を行う。フレーム上光路は全て真空とし光路差変化をなくす。フレーム変形と干渉計光路変化が無視できるので干渉計出力は共振器のミラー間幾何学長と見なすことが出来る。干渉計は暗縞(干渉計光路差が半波長の整数倍)のときその変位をサブ pm 精度で決定できる「位相変調ホモダイン型」あるいは「共振器共鳴を用いる。干渉計光源は周波数安定度の高いヨウ素安定型 HeNe レーザ( $\lambda_1:633\text{nm}$ )とする。内圧変化によるミラー

間幾何学長変化を補償するために常時特定の暗縞または共鳴点(すなわち波長そのもの)にロックするようミラーアクチュエータの変位を制御する。これで内圧変化に関わらずミラー間幾何学長を  $10^{-12}$ (200mm 共振器に対しサブ pm 揺らぎ)まで抑制する。このシステムを用い、共振器内が常圧あるいは真空のときの光路差を比較し空気屈折率を測定する。

(2) 通常、光干渉計測は恒温恒湿室で行い受動的に空気屈折率変動を抑止する。絶対空気屈折率は、温度・圧力等の関数であり、これらの計測で屈折率を受動的に決める式が長年研究されてきた(Edlen など)。しかしこの精度は  $10^{-8}$  程度であり、受動的な屈折率制御(すなわち恒温恒湿室利用など)での光干渉計測精度は  $10^{-8}$  と考えられる。光共振器のミラー間光学的長  $n_{air}L$ ( $n_{air}$ :絶対空気屈折率、 $L$ :ミラー間幾何学長)は、真空中の光速の半分  $c/2$  を隣接する共鳴点間の周波数差 FSR :  $f_{FSR}$  で割ったものとなる( $n_{air}L = c/2f_{FSR}$ )。従って FSR そのものを直接決定できればミラー間光学的長  $n_{air}L$  をメートル標準に準拠して決定できる。これは、もしミラー間幾何学長  $L$  が不変であれば真空中の FSR :  $f_{FSRv}$  と常圧空気中の FSR :  $f_{FSRair}$  を比較することで絶対空気屈折率  $n_{air}$  を算出できることを示している( $n_{air} = f_{FSRv} / f_{FSRair}$ )。(1)で挑戦する密閉幾何学長不変光共振器を用いれば真空と常圧でミラー間幾何学長  $L$  が  $10^{-12}$  まで不変なので FSR 測定から絶対空気屈折率を  $10^{-11}$  精度で決定できる。

(3) 恒温密封チャンバー+幾何学長不変共振器に内部圧力アクチュエータを組合せると、幾何学長と内部温度を保持しながら圧力駆動により空気屈折率を駆動制御可能である。特定の絶対空気屈折率  $n_{air}$  を指定することはある圧力(と温度)での共振器の FSR :  $f_{FSRair}$  を指定することと同じである。すなわち特定の FSR になるように零位法を用いて恒温密封チャンバー+幾何学長不変共振器内の圧力を制御すれば、指定した絶対空気屈折率にロック可能である。周波数を通して任意の絶対空気屈折率を指定し、それを保持できる恒温恒“絶対屈折率”チャンバーを開発することが可能であり、この手法はメートル定義とも類似し斬新である。絶対空気屈折率  $10^{-10}$  精度の安定性を目指すこと自体も斬新である。

#### 4. 研究成果

研究を2方向から行った。なお、最終目標に到達しておらず引き続き装置開発を行っている。

(1) 密閉型幾何学長不変光共振器の開発：密閉型光共振器の圧力変動による幾何学長変化を圧電素子で能動的に補正する機構を開発した。100kPaの圧力変動に伴う、共振器の幾何学長変動を10nm以下の分解能で補正することが可能となった。ただし、目標のサ

ブ nm には到達していないが技術的な課題を明らかにした。

(2) 光共振器の隣り合った共鳴点周波数の差(FSR)から求める手法と、共鳴周波数の追跡から求める手法を組み合わせた。実際にFSR追尾と共鳴周波数追尾が可能となった。周波数参照光源として、光コムを利用する手法も考案し、共鳴点追尾が出来る見通しが立った。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計0件)

[学会発表](計2件)

(1) 山岸敬登、山下雄大、明田川正人、周波数計測によるファブリーペロー共振器絶対光学長測定(第11報:FSR測定と共鳴展の同時追尾)、2015年度精密工学会春季大会学術講演会、C69、東洋大学、2015年3月19日  
(2) Duong Quang Anh, Syusaku Tomokage, Masato Aketagawa, Deformation compensation of a stabilized resonator under high pressure change based on a modified Pond Drever Hall Method、11th Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection Industry 2014、A09、つくば国際会議場、2014年9月3日

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者 明田川正人  
長岡技術科学大学 工学(系)研究科(研究院)(教授)

研究者番号：10231854

(2)研究分担者 韋冬  
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

(3)連携研究者  
( )

研究者番号：