

機関番号：13102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360066

研究課題名（和文）

周波数標準にトレーサブルなサブナノメートル精度・絶対光学長測定法の開発

研究課題名（英文）

Absolute length measurement with sub-nanometer accuracy using frequency standard

研究代表者

明田川 正人 (AKETAGAWA MASATO)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：10231854

研究成果の概要（和文）：

ファブリー・ペロー光共振器の光学的共振器長 (nL) は、光速度の半分 ($c/2$) を隣接する共鳴周波数差（自由スペクトル領域:FSR）で除算することで決定可能である。すなわち長さを周波数測定から決定可能である。本研究では、周波数標準及び同期検波法を用い光共振器の絶対光学長を零位法により相対不確かさ 10^{-8} オーダーで実験的に決定した。1メートルの絶対長さをナノメートルの不確かさで決定する見通しを得た。同様な手法を用い、空気屈折率変動を能動的に抑止した。

研究成果の概要（英文）：

Since the free spectral range (FSR) of a Fabry-Perot cavity (FP cavity) is defined by a half of light velocity in vacuum ($c/2$) divided by product of the geometrical distance between the two mirrors (L) and the refractive index in the FP Cavity (n), the FSR measurement is a potential method to measure the absolute length L . In this study, we have developed a method to measure the FSR of a FP cavity using frequency modulation with an electric optical modulator (EOM) and the null method. We have determined the FSR with the measurement uncertainty of order 10^{-8} . From this result, it is possible to measure absolute length of 1m order with uncertainty of nm or less. Using the same method, we have demonstrated the active suppression of air refractive index fluctuation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	12,200,000	3,660,000	15,860,000
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	15,600,000	4,680,000	20,280,000

研究分野：精密工学・精密計測・ナノメートルピコメートル計測制御

科研費の分科・細目：機械工学 生産工学・加工学

キーワード：精密位置決め・加工計測・長さ計測

1. 研究開始当初の背景

ナノテクノロジー・超微細加工技術の進展に伴い、加工精度に nm またはそれ以下を要求する事例が増えている。しかも加工精度は相対的なものでなく絶対的となり、かつ製品寸法の大きさに無関係になるものと予想する。

比較的大きな寸法（1m オーダ）の製品でも将来的には全体の絶対加工精度に nm を要求する時代が来る。もし 1m 立法の空間内の座標を nm 以下の精度で絶対計測できれば、革新的な工業製品を創成できる可能性がある。それには 1m オーダの長さを nm 以下の精度

で絶対計測する技術が必須である。

ただし、この計測技術はメートル定義（光速度を介して周波数から決定可能）とトレーサブルであることが求められる。従来から産業界で多用され準工業標準となっている商用レーザ干渉計・光学式リニアエンコーダなどは、ヨウ素安定化レーザなどの周波数安定化レーザで校正されメートル定義にトレーサブルである。ただし、1) その測定結果に nm かそれ以上の位相補間の不具合による周期誤差が混入すること、2) 基本的には変位計測であり絶対長さを得るには積分（すなわち干渉縞次数か基本ピッチ次数の絶対計数）が必要でこれが煩雑である、という2つの理由で絶対光学長測定には不向きである。1m を nm の絶対精度 (10^{-9}) で計測する手法は現在のところ確立されていない。また絶対幾何学長測定では、空気屈折率測定が大きな問題である

2. 研究の目的

本研究の最終的な目的は、メートル定義に準拠し、周波数そのものから1m オーダの絶対光学長（続いて絶対幾何学長）を nm 以下の不確かさ (10^{-9}) で決定する手法を開発し、これを従来測定機の校正や大型精密測定機器（例えば3次元測定機）に応用することである。

光共振器の最隣接共鳴モード間の周波数差(Free Spectral Range: FSR)は、真空中の光速度の半分を光共振器の絶対光学長（屈折率×幾何学長）で割り算したものに等しい。後述するように、共振器に、電気光学素子(EOM)で周波数変調した光を導入し、反射光または透過光に含まれるキャリア（主成分）と変調により生ずる複数の FM サイドバンド間の干渉、及び位相検波による零位法を組み合わせることで、FSR（すなわち共振器長）を決定する手法の開発が最初の目的である。さらにこの手法を改良し、FSR 測定の不確かさを 10^{-9} 以下（1mオーダの長さを nm 以下の不確かさ）で決定することが次の目的である。

3. 研究の方法

L, N, f, c, n をそれぞれ、幾何学的共振器長、干渉縞次数、光周波数、真空中の光速度、屈折率とすると共鳴時には、

$$nL = \frac{Nc}{2f} \quad \text{-----(1)}$$

が成立する。次数 $N+1$ と N （最隣接共鳴）のときの周波数差をFSRとすると、次が成立する。

$$nL = \frac{c}{2FSR} \quad \text{-----(2)}$$

(2)式は光学的共振器長 nL は、FSR 計測で得

られることを示す。また、この方式はメートル標準（光速度を介した周波数計測）に準拠する。本申請で提案する装置を図1に示す。図1では、周波数可変ダイオードレーザ ECLD の光を発振器 OSC で駆動する電気光学素子 EOM により位相変調を掛け、キャリア成分の両脇に多数の FM サイドバンド成分を発生させ、被測定共振器 Fabry-Perot Cavity に入射させる。このときの透過光（あるいは反射光）をフォトダイオード PDt（または PDr）で観察し、その出力

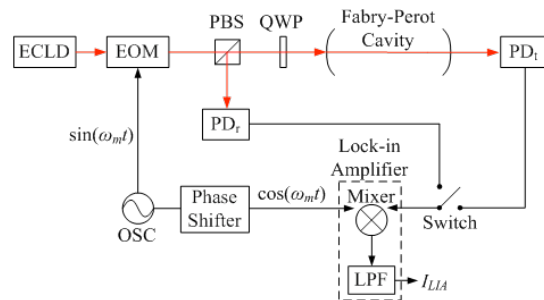


図1 FSR（絶対光学長）測定システム。
QWP：1/4 波長板、PBS：偏光ビームスプリッタ

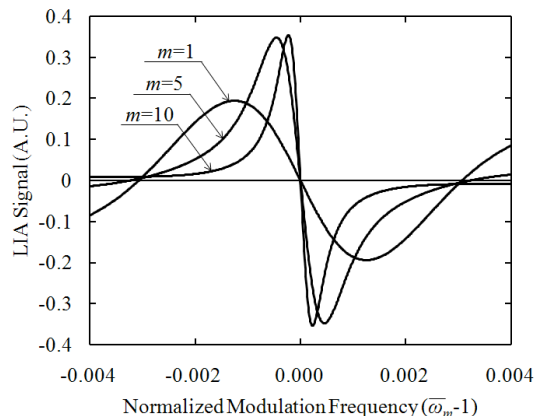


図2 変調周波数を走査したときの共振器透過光のロックインアンプ出力シミュレーション。横軸は FSR で規格化した変調周波数で $(\omega_m - 1) = 0$ のとき、変調周波数が FSR。キャリアの離調シフトは共鳴全幅の+29%

をロックインアンプ (=ミキサ+ローパスフィルタ LPF) に入力させ EOM の駆動信号と同期検波を行う。一方、ECLD のキャリア周波数は図では示さないが反射率あるいは透過率が一定（共鳴点からのキャリアの離調波数が一定）になるように調整する。OSC の駆動周波数は図には示さないが周波数カウンタで計測し、ロックインアンプ出力とともにコンピュータでデータ収集される。申請者は図1における透過光（反射光）のキャリア成分と FM サイドバンド成分の干渉を理論的に

解明し、ロックインアンプ出力 I_{LIA} が図 2 のようになることを見出した (雑誌論文①参照)。(ここで反射光は示さないが同様の結果になる)。EOM の変調周波数が共振器の FSR に等しい (図 2 では $(\omega_m - 1) = 0$ の) とき、ロックインアンプ出力がゼロクロスすることが判る。従ってゼロクロスする変調周波数を求めれば、それが FSR となり (2) 式より nL を決定可能である。このときのゼロクロス点近傍でのロックインアンプ出力の変調角周波数 ω_m に対する傾きは、

$$\frac{\partial I_{LIA}}{\partial \omega_m} = -16k_{LIA}P_0 \frac{F^2 \bar{\delta}_0}{(1 + F^2 \bar{\delta}_0^2)^2} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} [J_n(m)J_{n+1}(m)(2n+1)] \right\} \text{-----(3)}$$

となる。 k_{LIA} , F , P_0 , $\bar{\delta}_0$, $J_n(m)$, m はそれぞれロックインアンプ増幅率, フィネス, 光源レーザーパワー, n 次サイドバンドとそれに最も近い共鳴点との周波数差 (FSR で規格化), n 次のベッセル関数, 変調深さである。

4. 研究成果

研究方法で述べた手法を用い、FSR 測定 (すなわち光共振器絶対光学長) を行った。図 4 に FSR の決定例を示す (学会発表①参照)。

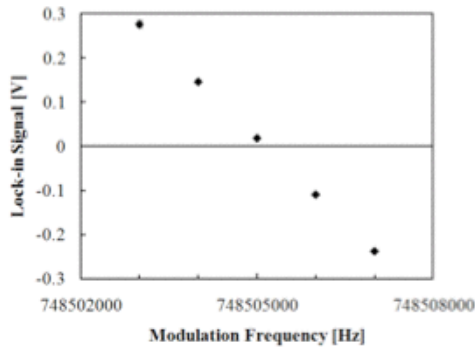


図 4 FSR の決定例。横軸・縦軸はそれぞれ EOM 変調周波数とロックインアンプ出力。

図において、横軸、縦軸は EOM 変調周波数、ロックインアンプ出力をそれぞれ示す。ゼロクロス点の周波数計測不確かさは、ロックインアンプ信号の変調周波数に対する傾きとロックインアンプ信号のノイズ振幅によって決定できる。傾きとノイズ振幅は、この実験では 0.1mV/Hz , 3mV であるため周波数の不確かさは、 $3\text{mV}/(0.1\text{mV/Hz})=30\text{Hz}$ となる。FSR はおよそ 750MHz (共振器長=約 200mm) なので、相対不確かさは $30\text{Hz}/750\text{MHz}=4 \times 10^{-8}$ であった。ロックインアンプ信号のノイズ振幅はほぼ一定なので、ロックインアンプ信号の変調周波数に対する傾きを大きくすることが、不確かさを小さくすることに直結する。これには上の (3) 式より、1) 光共振器への入射光強度を大きくする、2) 変調深さを大きくする、3) 光共振器のフィネス (ミラー反射率) を大きくする、4) 入射光の中心周波数を共振

器共鳴点から共鳴半値全幅の 29% だけずらす、ことが有効であることを明らかにした (雑誌論文①参照)。図 2 では、入射光強度 4mW 、変調深さ 8rad 、フィネス 300 で成されたものであり、これらを実現可能な 20mW 以上、 16rad 以上、 1000 以上とすれば、相対不確かさを $10^{-9} \sim 10^{-10}$ まで向上させることは充分可能である。

同様な手法で周波数標準を用いて、空気屈折率変動の計測 (雑誌論文⑤参照) と能動的抑制 (雑誌論文②参照)、ホモダインマイケルソン干渉計の光路差の周波数標準による決定 (雑誌論文④参照) などを行った。

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 7 件)

① Masato Aketagawa, Shohei Kimura, Takuya Yashiki, Hiroshi Iwata, Tuan Quoc Banh and Kenji Hirata Measurement of free spectral range of Fabry-Perot cavity using frequency modulation and null method under off-resonance condition, Measurement Science & Technology, Vol. 22, No. 2, (2011), 025302 査読有

② Tuan BANH QUOC, Yuria OHKUBO, Yoshinosuke MURAI, Masato AKETAGAWA, Active suppression of air refractive index fluctuation using a Fabry-Perot cavity and a piezoelectric volume actuator, Applied Optics, Vol. 50, No. 1, (2011), pp. 53-60 査読有

③ Masato Aketagawa, Takuya Yashiki, Shohei Kimura and Banh Quoc Tuan, Free spectral range measurement of Fabry-Perot cavity using frequency modulation, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 11, No. 6, (2010), pp. 851-856 査読有

④ 石下雅史, 松浦文生, 河杉正晃, 星野雄太, バン クォック トゥアン, 明田川正人, 周波数可変ダイオードレーザを光源とする位相変調ホモダイン変位計測干渉計 (-第 1 報: 要素技術の開発), 精密工学会誌, Vol. 76, NO. 6, (2010), pp. 673 - 678 査読有

⑤ Tuan BANH QUOC, Masashi ISHIGE, Yuria OHKUBO, Masato AKETAGAWA, Measurement of air-refractive-index fluctuation from laser frequency shift with uncertainty of order 10^{-9} , Measurement Science & Technology, Vol. 20, No. 8, (2009), 125302 査読有

[学会発表] (計 10 件)

① 岩田浩志・村井慶之介・バン クォック トゥアン・明田川正人・平田研二、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 4 報: 可動ミラーを伴う共振器の絶対光学長測定), 2011 年度精密工学会秋季大

会 学術講演会講演論文集, Vol.2011S,
(2011-3-15), K45.

②岩田 浩志, 村井 慶之介, **Banh Quoc Tuan**,
山下 綾平, 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,
日本光学会年次学術講演会 OPTICS &
PHOTONICS JAPAN 2010 論文集講演予稿 CD,
(2010-11-8), G028.pdf.

③Masato Aketagawa, Takuya Yashiki, Shohei
Kimura and **Banh Quoc Tuan**, Free spectral range
measurement of Fabry-Perot cavity using
transmission light, single frequency modulation
and null method under off-resonance condition,
Proc. of the 3rd International Conference of
Asian Society for Precision Engineering and
Nanotechnology, Kitakyushu, (2009-11-11),
1D-11-1968-p.pdf

[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 :
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 (AKETAGAWA MASATO)
長岡技術科学大学・工学部・教授
研究者番号 : 1 0 2 3 1 8 5 4

(2) 研究分担者

平田 研二 (HIRATA KENJI)
長岡技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号 : 4 0 3 1 4 3 6 4

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :