

最近の技術から

ナノメーター測長システム

石田 明*

新技術事業団吉田ナノ機構プロジェクト 〒300-26 つくば市東光台 5-9-9

1. はじめに

レーザー干渉を利用した測長によれば、広い測定範囲、高い分解能そして高い精度を得ることができ、汎用のシステムも市販され各種の分野で利用されている。しかし、さまざまな外乱により分解能に見合った精度を得ることは意外とむずかしい。たとえば、気温、気圧等の大気変化に起因する波長変動は精度に直接影響を及ぼす。大気変化は、通常これを測定して波長補正を行うことで対処する。しかし高精度を求めるときは、不均一で早い変化、すなわち空気ゆらぎへの対策が必要となる。残念ながら空気ゆらぎを全光路に沿ってリアルタイムで計測し波長補正を行うことは、現実的にはむずかしい。

空気ゆらぎを直接測定せずに屈折率を推定する方法として空気の分散特性を利用する多波長法がある。同時に複数の波長の光を使って測定し演算処理を行うことにより幾何学的距離と波長変動の影響を分離することができる。多波長法は、長距離測距の分野でよく研究され実用化が図られている¹⁻³⁾。当プロジェクトでは、干渉計を用いた光路長数メートル以内、分解能ナノメートル前後の変位測定に対して2波長法の適用を試みた⁴⁾。その結果空気ゆらぎの影響をリアルタイムで精度よく除去することに成功したので紹介する。

2. 2波長変位測定システム

幾何学的変位を D 、異なる2波長 λ_1 、 λ_2 の空気屈折率を n_1 、 n_2 とすると次式が成立する。

$$D = n_2 \cdot D - A \cdot (n_2 \cdot D - n_1 \cdot D) \quad (1)$$

$$A = (n_2 - 1) / (n_2 - n_1) \quad (2)$$

$n_1 \cdot D$ と $n_2 \cdot D$ は λ_1 光、 λ_2 光による測定量で空気ゆらぎの影響を含んでいる。補正係数 A の値は波長 λ_1 、 λ_2 と空気の構成比率から決定される。空気がゆらいだときその構成比率は変動しないと考えるとよいので A は空気ゆらぎによらない定数とみなすことができる。(1)式に

よる補正計算では、第2項で測定量のもつ誤差が A 倍に拡大される点が問題となる。この精度低下を抑えることが多波長法を実用化する際の重要な要点になる。

2波長光を得るために Ar^+ レーザーのキャビティ内に非線形光学結晶 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ (BBO) を挿入し、基本波 ($\lambda_1 = 488 \text{ nm}$) とその第2高調波 ($\lambda_2 = 244 \text{ nm}$) を同軸で取り出せるようにした(図1)。出力は、 λ_1 光が約 3 mW 、 λ_2 光が約 $100 \mu\text{W}$ である。

第2高調波発生を利用することにより2光の屈折率差を大きくとることができる。とくに λ_2 光を紫外域に設定したことが A の値を小さくするため、すなわち補正計算での誤差拡大を防ぐために有効であり本光源の特長の一つとなっている。2光の周波数 f_1 と f_2 の間には、常に2倍の関係がある ($f_2/f_1 = 2$)。そのため光源の周波数変動は(1)式の第2項では相殺される。この2光の組合せで補正係数 A の値は乾燥空気の場合 12.68 となる。湿度の影響はあるが小さいので無視できる。

2波長干渉計の構成を図2に示す。基本的には、二つの干渉計が二重になった測定系である。一方の鏡(CC)は偏光ビームスプリッター(PBS)から約120mm離れた位置に固定され他方の鏡はPBSから100~220mmの範囲で移動できる。2光は干渉した後プリズムで分離され別々に検出される。信号処理系は、リアルタイム処理とバッチ処理の2系統がある。40倍の信号分割回路を用いることにより前者の分解能は $\lambda/320$ (λ_1 光側: 1.53 nm, λ_2 光側: 0.76 nm) を得ている。また後者では干渉信号を A/D 変換した後演算処理を行いさらに1桁以上高い分解能を得ることができた。

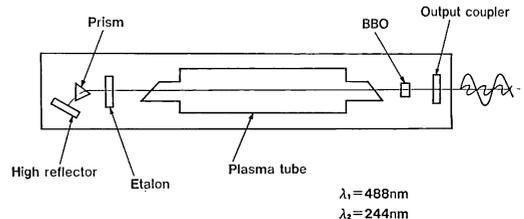


図1 2波長光源 (Ar^+ レーザー+BBO)

* 現在: (株)ニコン技術開発部 〒140 東京都品川区西大井 1-6-3

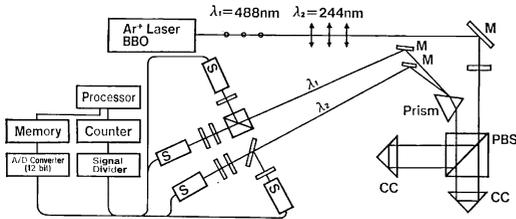


図 2 2波長干渉計構成図

3. 空気ゆらぎ除去の実際

図 3 (a), (b)は移動鏡を固定した場合の λ_2 光による実測値とバッチ処理による補正結果である。実測値は空気ゆらぎ, 光学系の振動等により図のように変動する。 λ_1 光による実測値もほとんどこれと同じである。補正結果によれば空気ゆらぎの影響が取り除かれていることがわかる。振幅 5 nm 程度の速い振動成分が残留している。これは光学系の振動に起因しているため除去されない。

図 4 (a), (b)は移動鏡をパルスモーター駆動のステージにより往復運動 (振幅約 250 nm, 周期約 10 s) させた場合の実測値 (λ_2 光) とリアルタイム処理による補正結果である。空気ゆらぎの影響が移動鏡の実際の変位から分離され有効な補正が行われたことがわかる。

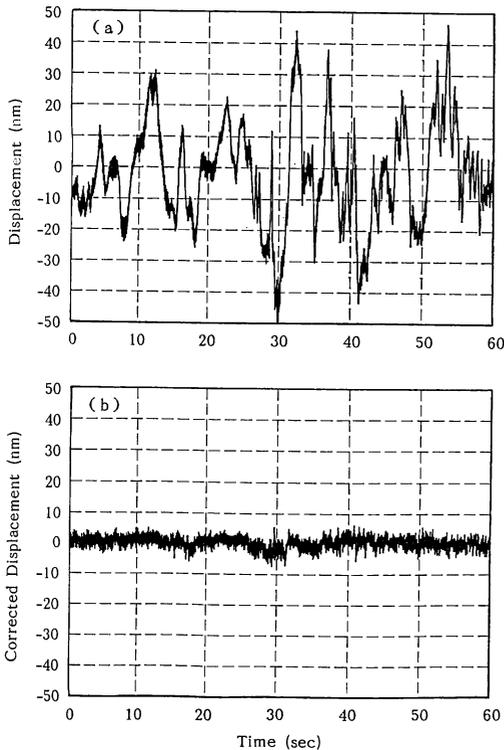


図 3 補正例 (移動鏡固定)

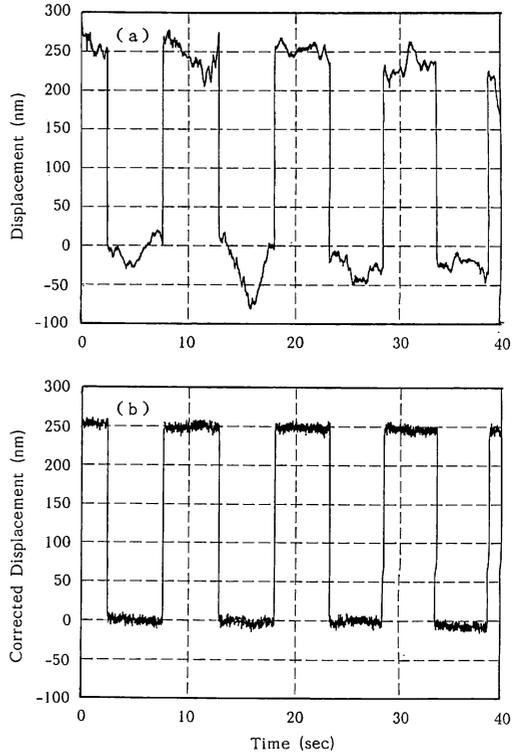


図 4 補正例 (移動鏡往復運動)

4. おわりに

第 2 高調波発生法を利用した 2 波長干渉計によりナノメートルオーダーの高分解能変位測定において空気ゆらぎの影響をリアルタイムで低減できることが確認された。以上述べたほかに圧力可変の密封セルを使い係数 A の実測値と計算値の比較を行った⁵⁾。また室内における空気ゆらぎ構造のモデル化とシミュレーションを行い, 光ビームの曲がり分離が 2 波長補正に及ぼす影響について検討を行っている⁶⁾。今後, 小型で安定性のよい 2 波長光源の実現により精密位置決め制御用の位置センサー等広範囲な分野での応用が期待できる。

文 献

- 1) L. E. Slater and G. R. Huggett: J. Geophys. Res., 81 (1976) 6299.
- 2) 藤間一郎, ほか: 第 51 回応用物理学会学術講演会予稿集, 27p-L-5 (1990).
- 3) 粟科植久, ほか: 第 37 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 29a-A-7 (1990).
- 4) A. Ishida: Jpn. J. Appl. Phys., 28 (1989) L473.
- 5) 石田 明: 第 50 回応用物理学会学術講演会予稿集, 29p-ZE-3 (1989).
- 6) 石田 明: 第 51 回応用物理学会学術講演会予稿集, 27p-L-12 (1990).

(1991 年 10 月 29 日受理)