

テクニカルレポート V o l . 1 4 - 6

株式会社フォトンプローブ

報告者 平野雅夫、神田麻美、黒川翔、平野ゆかり

報告日 2014年8月23日

- 題名** リアルモード長時間測定結果について（標準型光学系の真空中の動作について）
- 概要** 真空中で問題となるであろう（１）空気の屈折率変動・（２）大気圧による光学系の歪み、の２点を検討し、これらは大きな問題を引き起こさないであろうと検討された。温度変動による変位変動を検討した。
- 結論** 変位量変動は温度変動で説明でき、自由膨張の約４０％値の膨張が推測できる。縦分解能も１nm以下を確認できた。

報告内容

- １． 膨張と空気の存在について
- ２． 変位測定結果及び温度変動
- ３． 考察・反省

報告詳細

- １． 膨張と空気の存在について

前回の報告で、温度変動と変位量変動が直線関係にあり、変位量変動を温度変動で説明できることを示した。ここでは、光学系の温度膨張度合いに対する空気中と真空中での測定がどの程度変動が引き起こされるかを示す。

空気は屈折率を有する。HeNeレーザ波長に対して、 1.000276505 （標準状態）、である。これに対して、温度・圧力が変化した場合の空気の屈折率の変化式が幾つか提案されている。ここでは、その中のひとつであるエドリンの式

$$(n-1)_{T,P} = (n-1)_0 \frac{0.00138823 \times P}{1 + 0.003671 \times T}$$

を用いて、影響度合いを推測する。上式で、 T は温度[℃]、 P は気圧[Torr]、である。したがって、 760 [Torr]、 T [度]条件下と、 0 [Torr]、 T [度]条件下では、後者の屈折率が１であることより

$$n_{T,760} - n_{T,0} = \frac{0.0002917279}{1 + 0.003671 \times T}$$

分母の値を約１と近似すると、光路長は、 0.0002917279 倍だけ大きくなることを示している。標準型光学系では、 0.412 [m]の差があるので、 120.19 [μm]、だけ光路長が伸びたといえる。この伸びは大きな問題を引き起こす。リアルモードで長時間測定すると、大気圧は変動する。その変動幅は大きい場合、 12 時間において、 990 [hPa]から 1020 [hPa]程度までの範囲内で変動する。（単位が混在するので、Torrに換算すると、 742.7 [Torr]から 765.2 [Torr]である。）

$$\frac{(n-1)_{T,742.7}}{(n-1)_{T,765.2}} = \frac{742.7}{765.2} = 0.9706$$

また、

$$n_{T,742.7} = 1.00028509$$

$$n_{T,765.2} = 1.00029372$$

であることより、

$$\delta L = 0.412 \times (n_{T,765.2} - n_{T,742.7}) = 0.000003557 \quad [\text{m}]$$

つまり、3.5ミクロンの変動が発生することになる。

この大きさの変動は、温度変動が

$$\Delta T = \frac{0.000003557}{0.0000302 \times 0.412} = 0.28$$

存在する場合に相当する。通常990[hPa]から1020[hPa]間の気圧変動には、最低でも数時間要する。その数時間内に温度変動を、0.28[度]程度で収まらせるためには、それなりの設備が必要である。弊社の設備では、保障できない安定度である。

これにより、今回の光路長差0.412[m]を有する標準型光学系において、空気の屈折率変動を問題にする必要性は弱い。

しかしながら、真空中での測定での問題点を探るため、実験を行った。

最大の問題点は、真空部屋に置かれた光学系の歪みである。特に、真空部屋の床面の歪みである。光学系は、アルミベースで合計9[cm]厚を有する。一方、内径は35[cm]である。大気圧は 1.01×10^5 [Pa]である。それゆえ、床面全体に及ぼされる力は総量で9748.6[N]、この総量が均一に床面を押すのであるが、真空部屋の壁に相当する部分は強固で、天井面と結合されているので、床面は一種の梁状態である。この力でも歪みが影響しないかが問題となる。

そこで、理論的にゆがみ両方を算出した。弾性関係の書籍によると、周囲が支持された円板に等分布荷重が加わった場合の、最大応力 σ_{MAX} 、および最大たわみ w_{MAX} は

$$\sigma_{MAX} = \frac{3(3+\nu)pa^2}{8h^2}$$

$$w_{MAX} = \frac{3(1-\nu)(5+\nu)pa^4}{16Eh^3}$$

と示されている。ここで、 ν はポアソン比(アルミの場合、0.345)、 E はヤング率(アルミの場合、 7.03×10^{10} [Pa])、 p は圧力、 a は円板の半径(20cm)、 h は円板の厚さ(9cm)、である。この式に代入すると

$$w_{MAX} = 2.07 \quad [\mu\text{m}]$$

を得る。一件問題ないように見える。この変動が光路をゆがめて光路長を変化させているので、光路長の変動量を算出する。光路を単純に扱うと、周辺部分から入射し、中心部分で反射する。この反射光が周辺部に届きビート信号を作る。すると光路長は歪みのある場合とない場合で、半径20cmとすると、

$$L(\text{歪みのない場合}) = 0.4 \quad [\text{m}]$$

$$L(\text{歪みのある場合}) = 2 * \sqrt{0.2^2 + (2.07 \times 10^{-6})^2} \cong 0.4 + 1.07 \times 10^{-11} \quad [\text{m}]$$

光路の変動量は、0.01nm、であり、問題にしなくても良いことが知れた。

以上で、今回の真空中の測定において、空気の存在、大気圧による歪みは、問題にしなくても良いこと

が知れた。最大の問題は温度制御にあると知れる。

2. 変位測定結果及び温度変動

温度変動に対する変位置量変動のグラフを示す。温度変動は

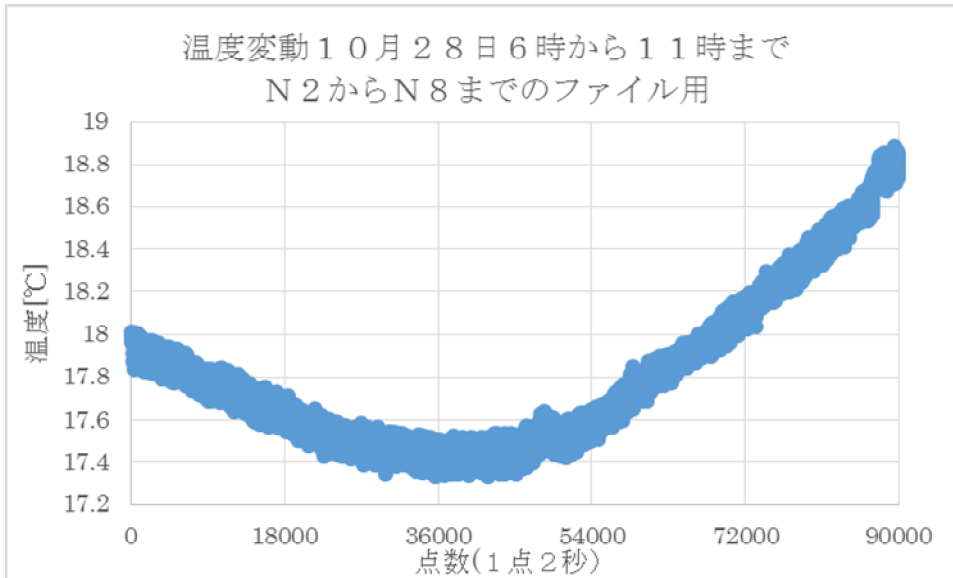


図1 温度変動 変位測定開始の3時間30分以上前から測定
温度測定ノイズは±0.1度程度

以下の3データを示す。

- (1) N4データ(測定時刻9時35分から16分40秒間測定)
- (2) N6データ(測定時刻10時12分から16分40秒間測定)
- (3) N8データ(測定時刻10時54分から16分40秒間測定)

これらのデータを計測する際の温度変動は一様に上昇し、0.6 [℃/h]、の勾配と知れる。

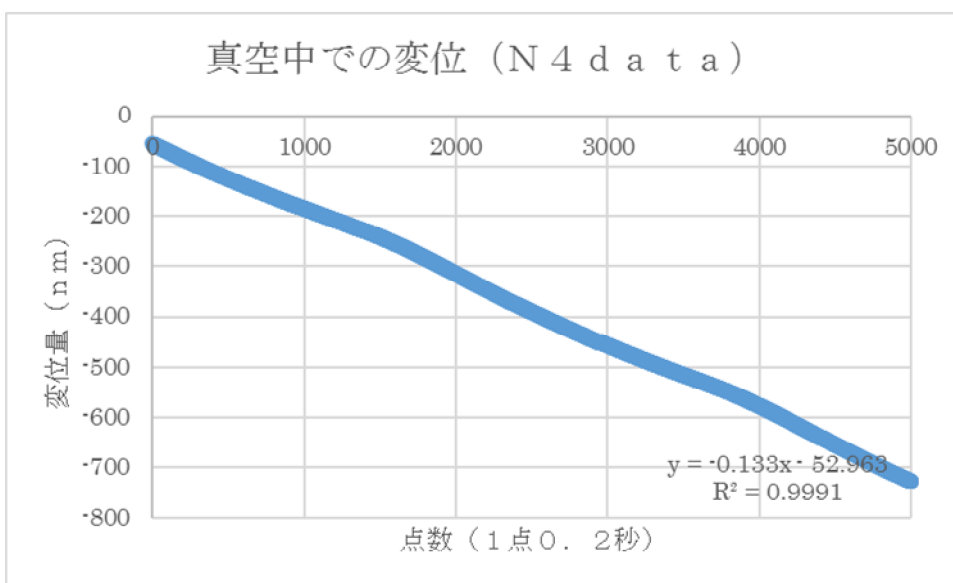


図2 N4データ

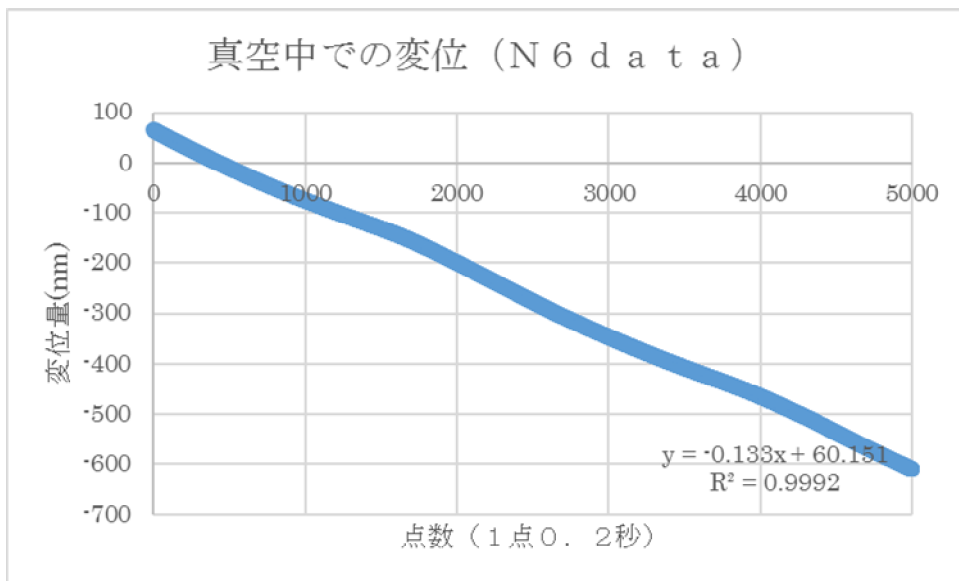


図3 N6データ

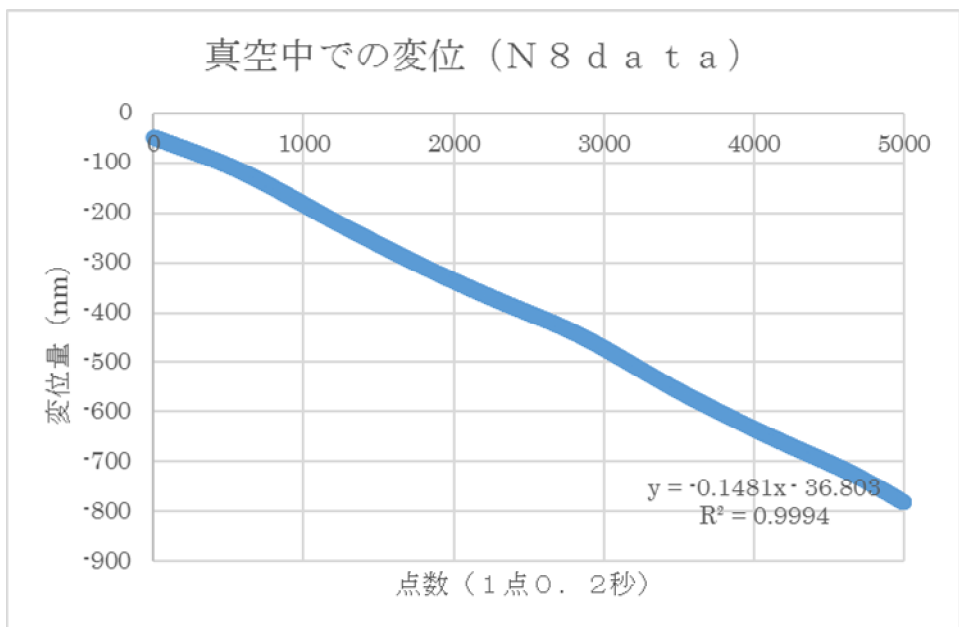


図4 N8データ

3データ共に、負の勾配の直線の変位量変化を示した。この直線性は温度の変化が直線的であることと一致する。

アルミの線膨張係数 (23.1×10^{-6}) を用いると、0.6度の温度変動で、光路長差412mmは

$$0.412 \times 23.1 \times 10^{-6} \times 0.6 = 5.710 \times 10^{-6} \quad [\text{m/h}]$$

16分40秒では

$$5.710 \times 10^{-6} \times 1000 / 3600 = 1.58 \times 10^{-6} \quad [\text{m}]$$

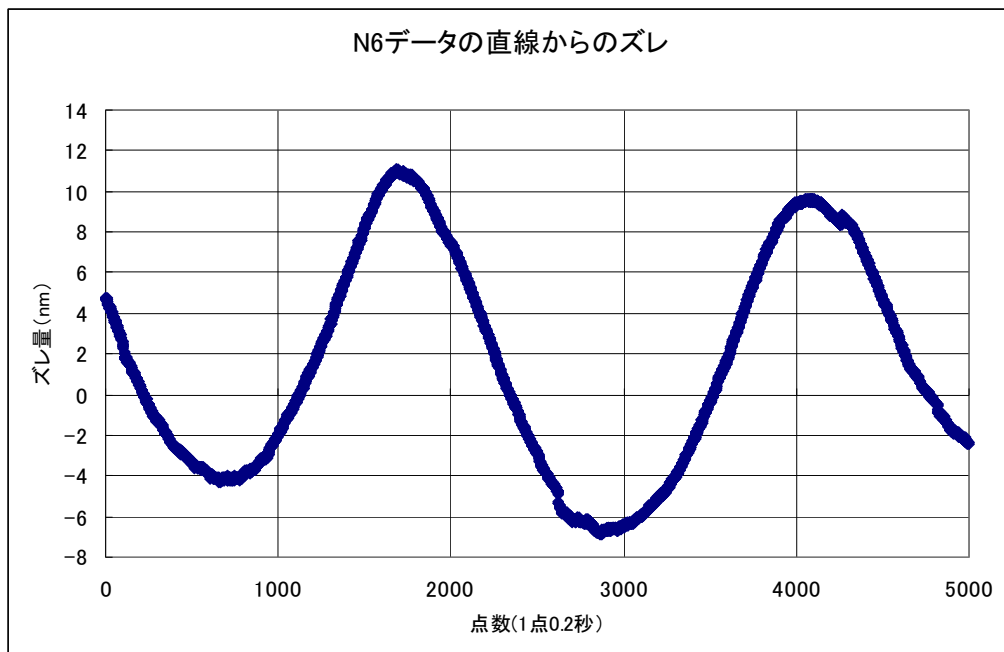
実験はこの理論的な自由膨張の値の約半分を与えている。

このことは、標準型光学系において、光路長差を生み出してはいるが、光学ベースを機械的に固定し

ているため、膨張度合いが減少し、その割合として、 $0.665 / 1.58 = 0.42$ だけ、膨張すると知れる。

3. 考察・反省

3つのデータいずれも、波を打っている成分が存在するように見える、その波の周期もほぼ同じと思われる。そこで、直線近似を行い、その直線からの変化量を求めた。(N6データのみ示すが他もほとんど同じ変動を示した)



2つの変化が知れる。

- (1) 振幅が約 7.5 nm、周期約 4.70 秒、の正弦波振動
- (2) 周期 1000 秒以上の変動(今の段階では周期性があるか否か不明)

周期 4.70 秒(周波数は約 2.1 mHz)の超長周期振動の発生源は現在不明。

前回レポートで示したように大気中では発生しないことより、真空ポンプ動作に関わることであることは明確であろう。しかし、真空ポンプの振動・騒音は、50 Hz の高調波が予想される。風の流れが継続的に周期性を有するとは考えにくい。

可能性としては、次の点がある。真空ポンプの制御でほとんど真空度合いが変わらない状態にある。空気の流れはあるとは思えない。真空ポンプは 2 枚のルーツを有し、そのルーツを回転させるモーターと回転制御のためのギアボックスがある。ルーツのあるポンプ室とギアボックス部は軸受けとラビリンスシールで圧力的に分離されている。上図のようなズレが生まれるためには、何らかの力が働いたであろう。この力の源を加速度の発生と考える。この加速度は、回転部の回転が一定ではなく変動したことに起因させることも出来る。ギアボックス部で回転制御が行われていれば、そしてその制御が 500 秒程度の周期であるとすれば、上記のズレは発生するのではないだろうか。回転が速いほど慣性が大きく、短時間での制御は無理であり、この程度の長い周期を有したとしても理解できる。

使用真空ポンプ；ドライポンプ（2 段ルーツポンプ型）