

テクニカルレポート V o l . 1 4 - 5

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 2 0 1 4 年 7 月 2 0 日

題名 リアルモード長時間測定結果について(標準型光学系において)

概要 ヘテロダイン処理系において、いくつかの問題点を解決した後、リアルモード測定を行った。リアルモード測定は、種々の条件を選択できるようにした。そして、標準型光学系において、長時間測定を行い、その変動を記録した。変位量と同時に温度変動も測定した。

結論 リアルモードで長時間測定を可能にした。

温度は熱容量の大きい真空チャンバーの存在により、約 2 1 5 分±1 5 分遅れてその温度変動に対応する変位量を引き起こすことが知れた。その遅れを考慮して、変位量変動は温度変動で説明できた。縦分解能も 1nm 以下を確認できた。

報告内容

1. リアルモード設定
2. 長時間変位測定結果及び温度変動
3. 考察・反省

報告詳細

1. リアルモード設定

今回の長時間測定において、次の条件下で行った。

項目	設定等
光学系	標準型光学系
ビート周波数設定	2. 5 M H z
処理回路プログラム	F P G A 搭載(弊社製)
処理回路基準水晶発信機周波数	1 2 0 M H z
処理 P C	E P S O N
処理 P C 上の L a b V i e w ソフト	弊社製
データ取得時間間隔	1 μ s
平均したデータ点数	1 6 3 8 4 個
記録データの時間間隔	0. 2 秒
記録データのビット配分	整数部 2 4 ビット、小数部 8 ビット
記録データ数	2 6 0 0 0 0 点
記録時間	1 4 時間 2 6 分
測定環境	大気圧
温度制御	特になし

温度モニター	1 3箇所をモニター
振動制御	除震台上での測定、夜間測定
環境制御	風の流れを押さえ、真空チャンバー内で測定
空調	2 重の実験室内での空調断

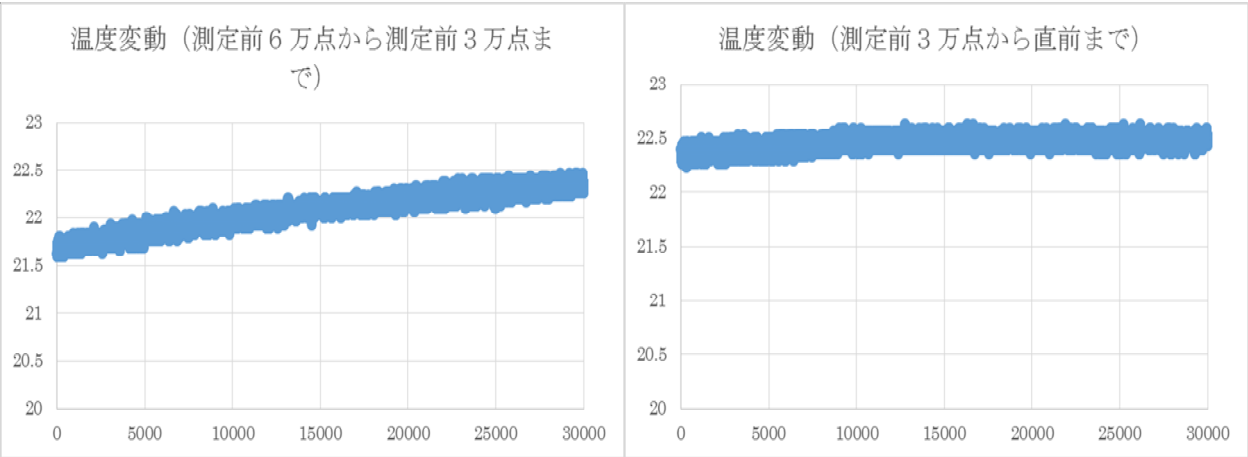
リアルモード測定に関しては、テクニカルレポートV o 1． 1 4－4を参照のこと。

2． 測定結果(変位量及び温度)

標準型光学系は、光路長差が大きいため、温度に大きく左右されると予測される。(標準型光学系に関しては、テクニカルレポートV o 1． 1 3－6を参照)

そこで、変位量計測に入る 2 0 0 分以上前から測定を開始した。

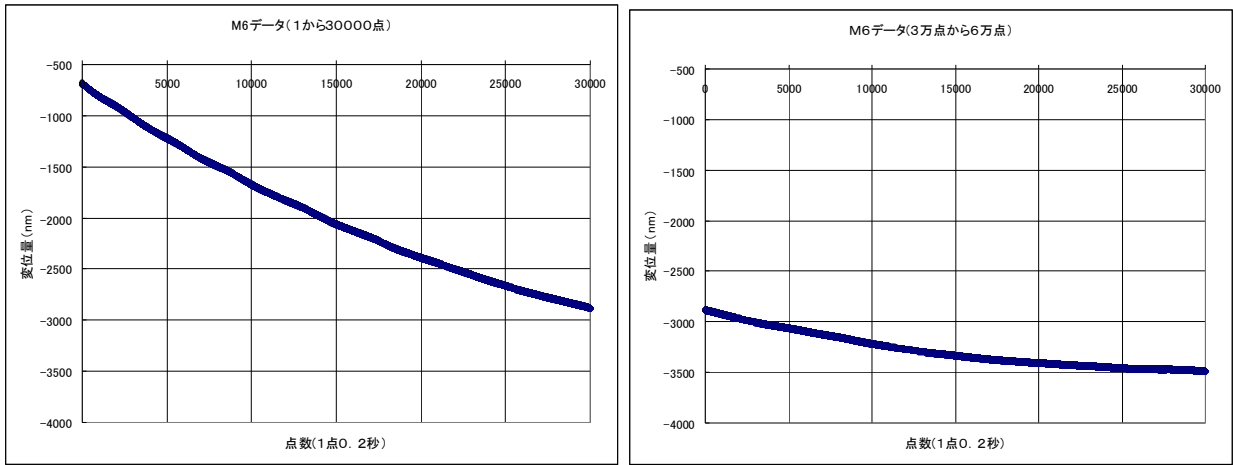
次に変位量及び温度変動を示す。

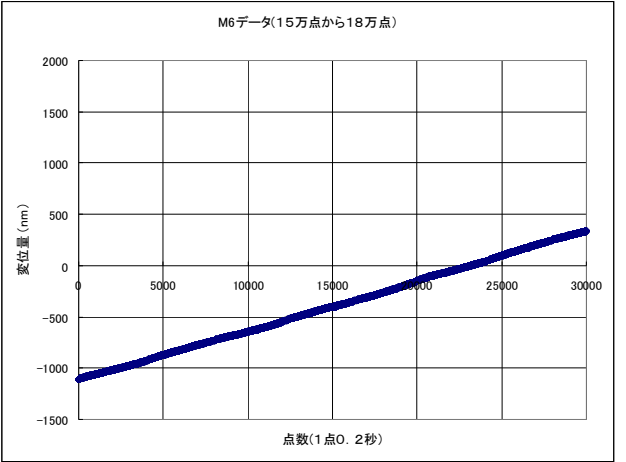
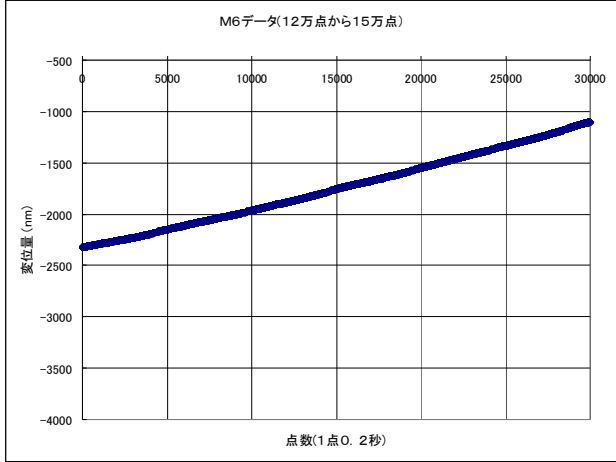
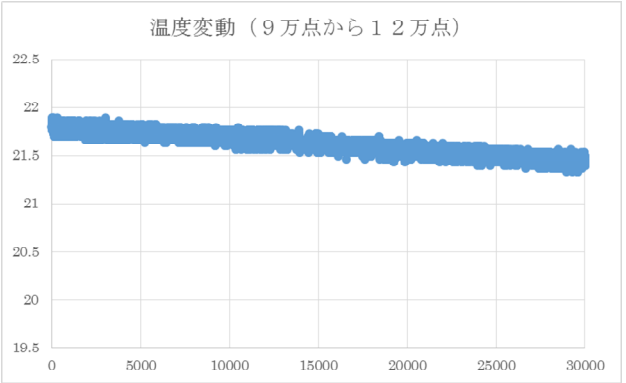
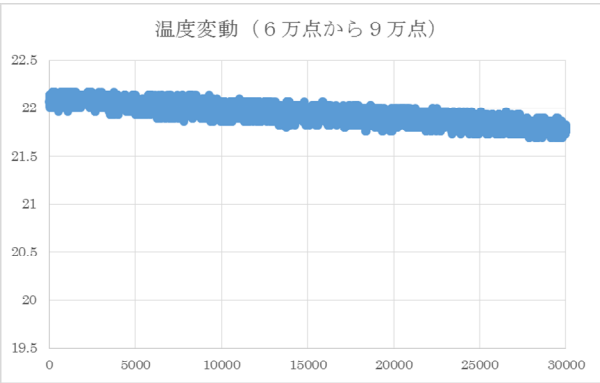
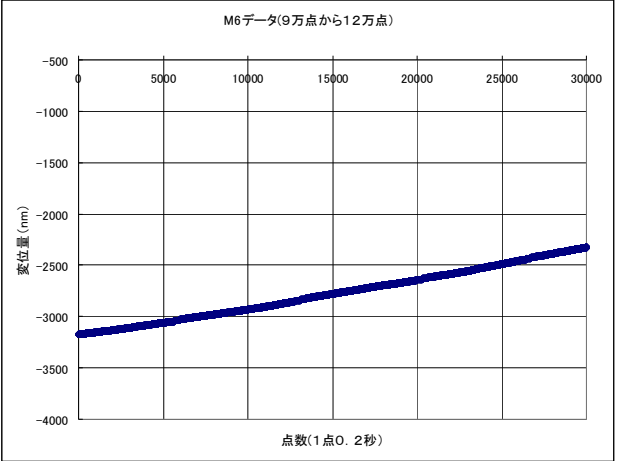
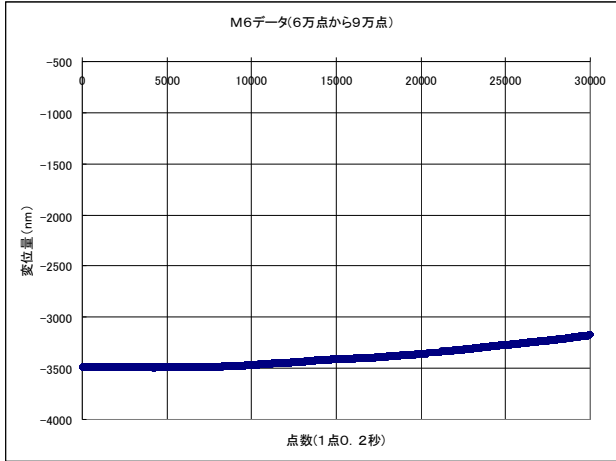
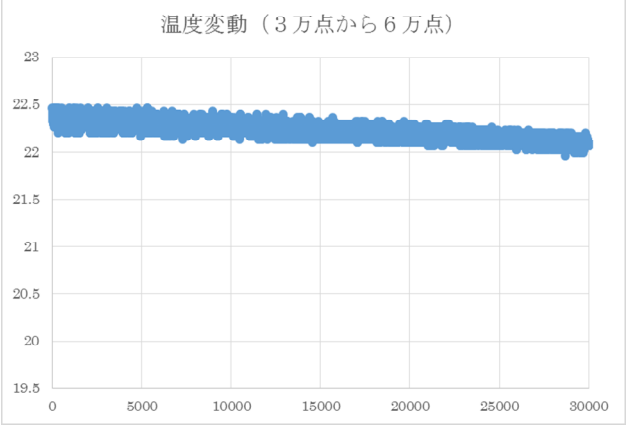
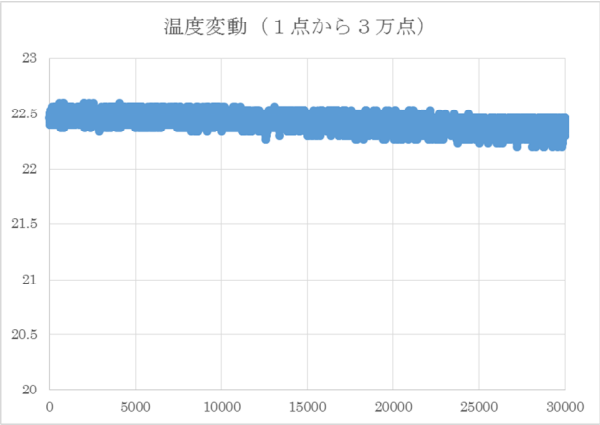


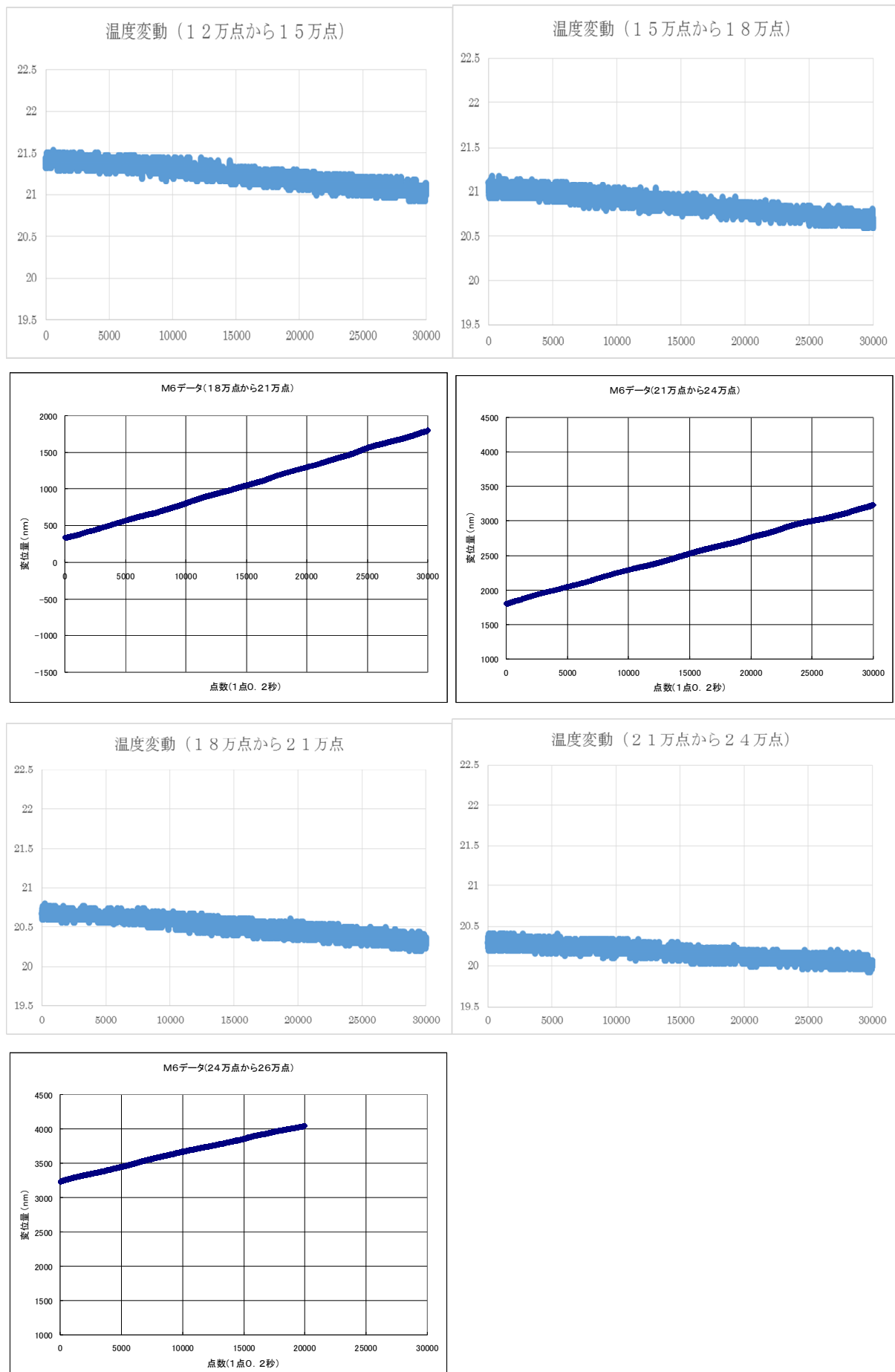
グラフの説明(以下のグラフも同様)

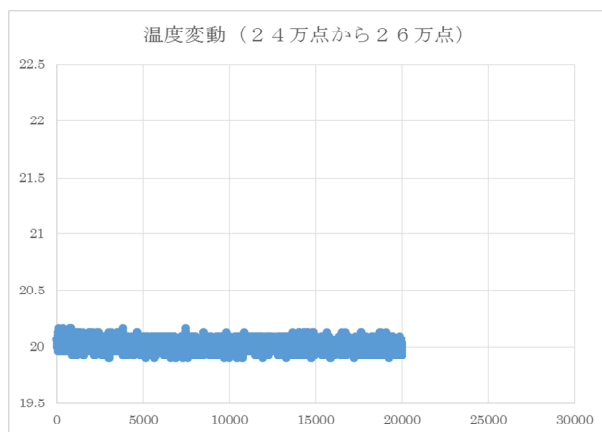
温度変動；横軸 0 点から 3 0 0 0 万点。1 点 0． 2 秒で計測。したがって、1 グラフは 1 0 0 分間の計測に対応する。データ幅は温度検出素子 (P t 1 0 0) の精度による。

変位量変動；横軸 0 点から 3 0 0 0 万点。1 点 0． 2 秒で計測。したがって、1 グラフは 1 0 0 分間の計測に対応する。









温度計測も0.2秒に1点であり、真空チャンバーの外壁5箇所の平均値を持ってあらわしている。温度計測の精度は0.1度が公称値である。

結果より次の点が知れる。

- ① 測定時間中に2.5度変動し、変位量は、7500nm変動している。
- ② 変位量は計測後約60000万点（200分）において、最小値を示し、その後変動が反転している。一方、温度変動は測定前約10000点（30分）において、最大値を示し、その後変動が反転している。
- ③ 測定26万点付近では、温度が一定になるにもかかわらず、変位量は増加している。
- ④ 測定後6万点から18万点まで、温度は一定の割合で減少している。一方、変位量も12万点から20万点領域で一定割合で増加している。

この結果は以下のことを示している。

1. 温度変動の遅れ

温度変動の寄与は6万点から7万点（200分から230分）遅れる。これは真空チャンバーの熱容量が大きい（アルミ材の体積約 10^5 cm^3 ）こと、空気層など絶縁体で囲まれているため、放熱が遅れることが原因であろう。この遅れは結果③の説明にも当てはまる。

2. 温度変動による機械部材の膨張

標準光学系では光路長差を大きくとっている。そのため、光路の温度変動がそのまま計測値に反映する。変位量18万点から24万点までの直線の変動と、温度12万点から18万点までの直線の変動を検討する。測定値に対して最小二乗法により直線式を求める。直線式として、

18万点から21万点に対して

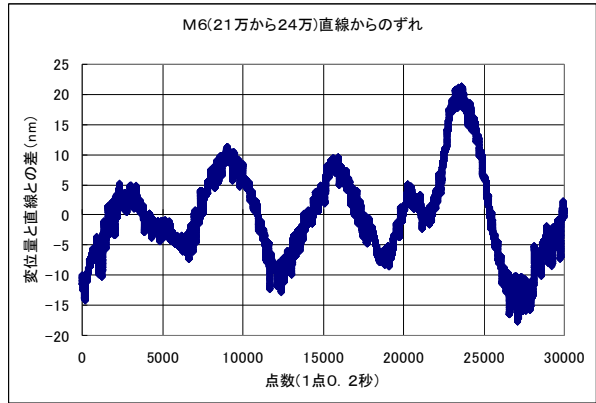
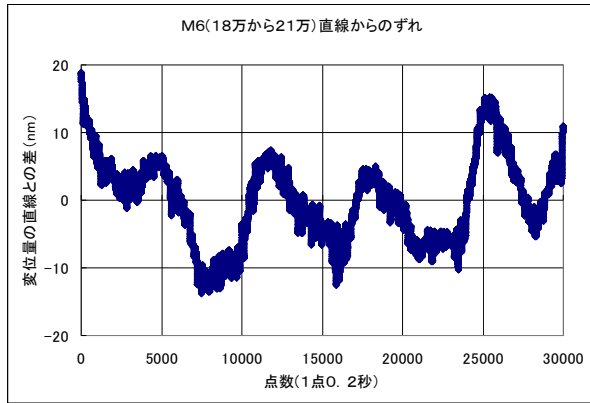
$$\text{変位量} = 0.2455 \times \text{時間(秒)} + 316.7355 \quad [\text{nm}]$$

21万点から24万点に対して

$$\text{変位量} = 0.2369 \times \text{時間(秒)} + 1810.399 \quad [\text{nm}]$$

を得た。時間は秒単位である。この直線からのずれをグラフ化したのが次図である。

これらのグラフは約5000点（約16分）の周期で変動する成分があるものの、ベースの変動は直線であることを示している。つまり、この時間領域では直線の変動しているといえる。



この直線の傾きこそが、温度変動に対する光路長の変動と関係する。つまり光路長差 ΔL がある場合に、温度変動 ΔT （1秒あたりの温度変動）があった場合、使用している機械部材の線膨張係数を α とすると、1秒当たりの変位量 δL は、

$$\delta L = \alpha \times \Delta L \times \Delta T \quad [\text{m/s}]$$

である。部材としてアルミニウムを用いているので、 $\alpha = 3.02 \times 10^{-5}$

[1/K]。標準光学系では、 $\Delta L = 0.412$ [m]。また、温度計測の結果より $\Delta T = 5.8 \times 10^{-5}$ [K/s]。を用いると、

$$\delta L = 0.72 \quad [\text{nm/s}]$$

となり、上記直線解析結果の約3倍程度の開きがある。

この開きにつき次の議論が出来る。

① 光学系のベース材質

上記線膨張係数は理科年表により引用している。実際に利用したアルミが純アルミではなく、更に黒アルマイト加工をしている。これにより、若干の相違がある。

② 光路長差

上式は熱による自由膨張の場合の変動を計算している。しかしながら、実際は光学ベースは多数のネジにより固定され、大きな熱容量を有する構造になっている。個機械的な光路長は412mmでも、実際に熱膨張に寄与する度合いは制約より大きく減少すると思われる。その度合いは評価できないが、光路長差の30%程度が線膨張の対象として寄与すると予想されよう。

③ 温度変動

計測地点は光学ベースそのものではないが、温度の絶対値変動が小さいので、高温時と低温時では熱の出入りはほとんど同じであろう。熱の出入りに時間的遅れがあること、熱容量が非常に大きいこと（アルミ材換算で0.1立方メートル）、から計測の温度変動そのものが光学系に働いていると思われる。

これより、理論値が計測値の3倍程度の値を示しても、自由膨張ではない点を考慮すれば、予測値としての値（ $0.72 \times 0.3 = 0.22$ [nm/s]）と同程度として理解できる。

その他、空気の屈折率の温度依存性を検討する。大気圧が同じだとすれば、15度から16度へ1度変動する場合、空気の屈折率の変動 Δn は

$$\begin{aligned} \Delta n &= 2.76505 \times 10^{-4} \times 0.003286 \\ &= 9.08699 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

ΔL に対して、光路長変動 δL は、1度変動が約33000秒間におきることより、1秒間の変位は

$$\begin{aligned}\delta L &= \Delta L \times \Delta n / 33000 \\ &= 1.13 \times 10^{-11} \quad [\text{m/s}] \\ &= 0.0113 \quad [\text{nm/s}]\end{aligned}$$

と推測できる。主たる相違原因は光学ベース(アルミニウム)の膨張によると判断できる。

光学ベースをインバー(線膨張係数 $= 0.13 \times 10^{-6}$)にすれば、現状の観測条件であっても

$$\delta L = 0.0043 \quad [\text{nm/s}]$$

となり、空気の屈折率変動が無視できなくなる高精度計測になることが知れる。

3. 考察・反省

リアルモードでの長時間測定には問題点が多く発生し、当初は試行錯誤の連続であった。プログラムミスから始まり、ハードウェア上の問題、機械部品の剛性問題、など多岐にわたった。それらの詳細は、テクニカルレポートVOL. 14-4、に記す。

いずれにせよ、問題点を解決した後は(ただし、現在最大の問題として、機械部品の剛性問題が残っている)、14時間を越す長時間連続計測を可能にすることができた。今後はリアルモードでの、30時間連続計測可能な形にすることも視野に入りたい。

温度変動の測定に関しては、チャンバー内に測定端子を設置できない欠点があるため、光学ベースの温度を直接モニターできない欠点がある。これも今後の課題であろう。

予想通りの、変位量と温度変動の結果を得たことは、逆に、空気の屈折率はさほど問題にならないレベルの測定であることを認識させられた。これから、 $\Delta L = 40 \text{ mm}$ の第1の多重型光学系、 $\Delta L = 0$ の第2の多重型光学系での測定を行う予定である。

変位量と温度変動の結果が一致することは精度高く測定できていることの証明でもあると判断できる。

以上