

テクニカルレポート V o l . 1 5 - 4

株式会社フォトンプローブ

報告者 平野雅夫、黒川翔、平野ゆかり

報告日 2 0 1 5 年 3 月 3 0 日

題名 1 ビーム出射プローブを用いたガラス面の変動測定

概要 標準仕様(標準光学系と同一発想)のプローブ 1 出射方式を作製し、光電変換装置も APD を基盤に装着した構成で作製した。そのプローブ等を用いて、リアルモードで素ガラス面の特性を評価した。

結論 素ガラス面の変動は十分な SN 値を持って測定できた。素ガラス裏面からの反射は、光学接着剤とウェッジプリズムを用いて抑えることが出来、素ガラス表面からのみの反射光で特性を評価できた。

プローブの固定が不十分なため、変位量変動は予想以上に大きい、温度依存性は今までの報告と同じく依存性が見られた。

報告内容

1. 1 ビーム出射プローブの構成等について
2. 試料について
3. 変位量変動例
4. 裏面の測定への影響について
5. 考察・反省

報告詳細

1. 1 ビーム出射プローブ構成等について

1. 1 構成

構成は標準型光学系を凝縮した構成であり、細部にわたって弊社製品が使われており、ノウハウが多いので、詳細は割愛する。全体の寸法は図 1 に示す。プローブへの光入射は定偏波ファイバー2 本により行い、プローブからの戻り光はマルチモードファイバーにより行っている。

定偏波ファイバーは AOM の回折光を受光し、マルチモードファイバーは光検出器に結合される。

周波数安定化 HeNe レーザ出射から AOM の回折光の受光までの回路は新規に制作した。その他の回路等、(マルチモードファイバーからの出射光の受光回路(光検出器回路)、光電変換回路、その他の装置)、に関しては、今までとほとんど同じ回路を用いている。これらの点に関しては前年度報告とほぼ同じであり、詳細は省略する。

光ファイバーは外力により影響を受けやすく、温度変動にも敏感である。そこで、光ファイバー保護管を用いて保護されている。

1. 2 特性

プローブの特性を示す。

項目	仕様・特性	備考
出射光量	$> 100 \mu W$	
出射光の偏光	直線偏光光 消光比 20 dB 以上	
出射光のビーム径	出射口で約 0.6 mm ϕ	
出射光の拡がり角	$< 2 \text{ mrad}$	
形状	直方体構造	円筒型構造も検討

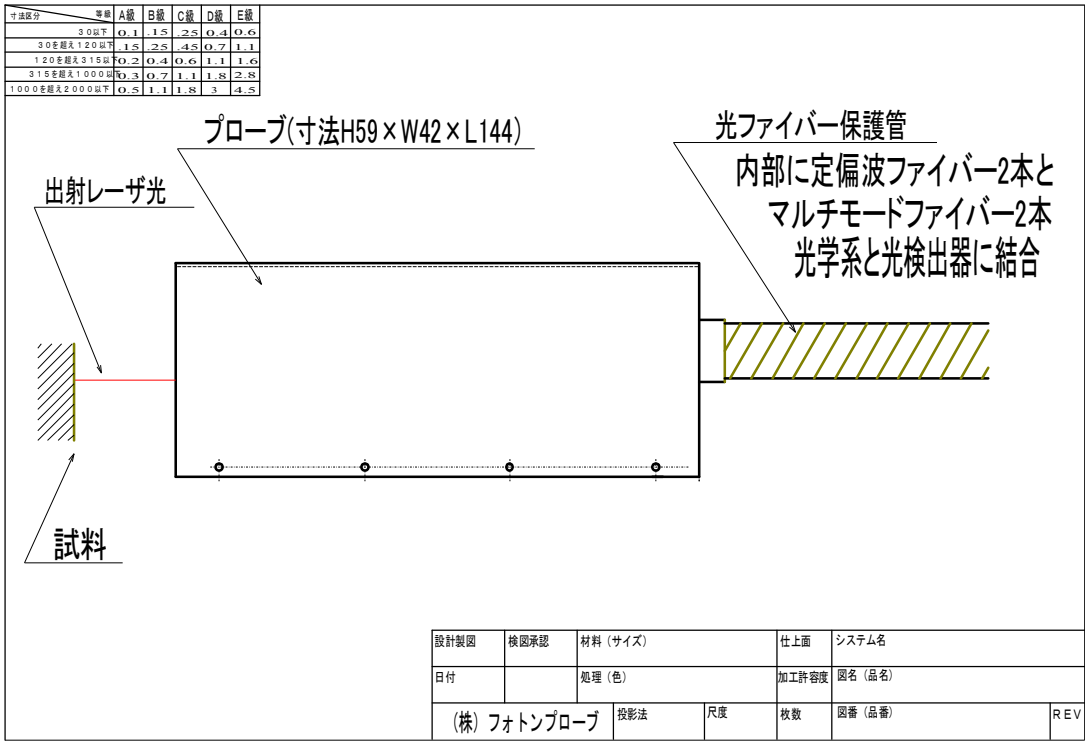


図 1 標準型プローブの外観側面図

2. 試料について

素ガラス表面(反射率約 4%)を試料として、プローブによる測定を行った。

試料は 3mm厚の平行板ガラス(材質 BK7) である。(平行度合いは不明であるが、ウインドウ材料として使用されているものを使用した)。レーザ光の反射面は表面と裏面の両面があり、表面のみの変動を求めるには、裏面からの反射光を抑える必要がある。ガラス表面からの反射原因が、ガラスと空気の屈折率の相違に基づくことから、裏面からの反射を抑えるために、2 図に示すような構造を構成した。ウエッジプリズム(BK7, ウエッジ角数度)と光学接着剤の使用により、反射率は測定不能程度 (0.5 %以下、ウエッジプリズム等がある場合とない場合の反射光量の比較より算出した。精度は0.5 %程度) にすることが出来た。これにより、試料が0.2 mm厚の場合においても、測定が可能になった。

ウエッジプリズムと光学接着剤を用いた場合の反射光量減衰の理由

通常界面は光の反射を起こす。これは、界面での屈折率の差があるからである。

単に、平行板ガラスとウエッジプリズムを機械的に接触させた場合、空気層を除去することが出来ないので、界面が 2 つ存在する形になる。反射光は存在する。一方、光

学接着剤を用いれば、その空気層を取り除くばかりか、屈折率の変動をない状態にすることが出来る。これにより、反射光量が減衰する。

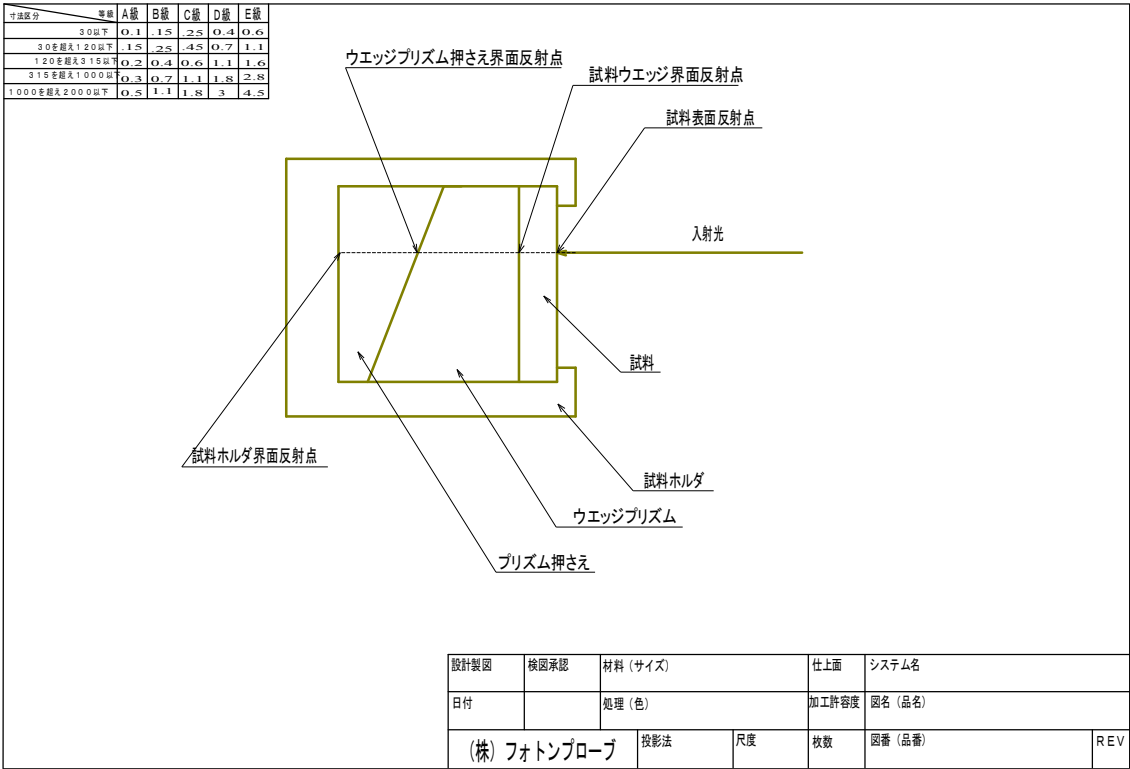


図 2 試料の構成

3. 変位量変動例

温度と変位量を長時間測定した。測定時間間隔を 0.2 秒として、5000 点（1000 秒）の測定を繰り返した。その結果の一例を、図 3、図 4 に示す。温度変動が短い時間ながら大きいのは、今回の光学系が実験室内で、ほとんどカバーのない状態で測定されたことによる。空調の風量変動により、0.3 度の短時間変動が繰り返し起きていることが見て取れる。このような温度環境下での変位量測定で、更に光学系を支えるベースの剛性が悪い条件が重なっている。プローブの光路長差は約 30 cm であり、ベースは鉄とアルミの混在である。

今まで報告した、標準型光学系及び多重型光学系は真空チャンバー内に設置されたため、真空チャンバーの大きな熱容量のために、測定系への温度影響が緩和され、遅延が見られた。これに反し、プローブ測定では、真空チャンバーに相当する構成部品がないため、空気温度が遅延することなくプローブ全体およびベースに影響を与えている。その様子が図 3 と図 4 の変動の同時性に見られる。変位量測定している時間領域は温度測定データの 6000 点から 6500 点に対応する。この時間領域で、温度は約 0.2 度 V 字型に変動している。そ野時間領域における変位量も V 字型の変動を見せている。

光路長差による変位量の変動を先の報告と同じように議論する。鉄の線膨張係数、 1.18×10^{-5} 、を用いると、

$$0.3 \times 1.18 \times 10^{-5} \times 0.2 = 0.71 \times 10^{-6} \quad [\text{m}]$$

となり、0.7 ミクロン程度が予測される。実験結果の、0.3 ミクロン、に比し 2 倍程度大きな値であ

る。これは自由膨張でないことに起因すると考えられる。(この点は、先の報告書で議論した際に得られた結果と一致する。つまり自由膨張による理論的算出値と実際の測定値の間には差異があり、実験値は自由膨張理論値の約 30% から 50 % 値であるとする先の報告と一致する)

これにより、プローブにおいても、変位量変動は温度変動に起因するのであって、そのほかの要因に起因しないであろうと言える。

つまり、素ガラス試料表面の変位量は正しく測定された、と結論できる。

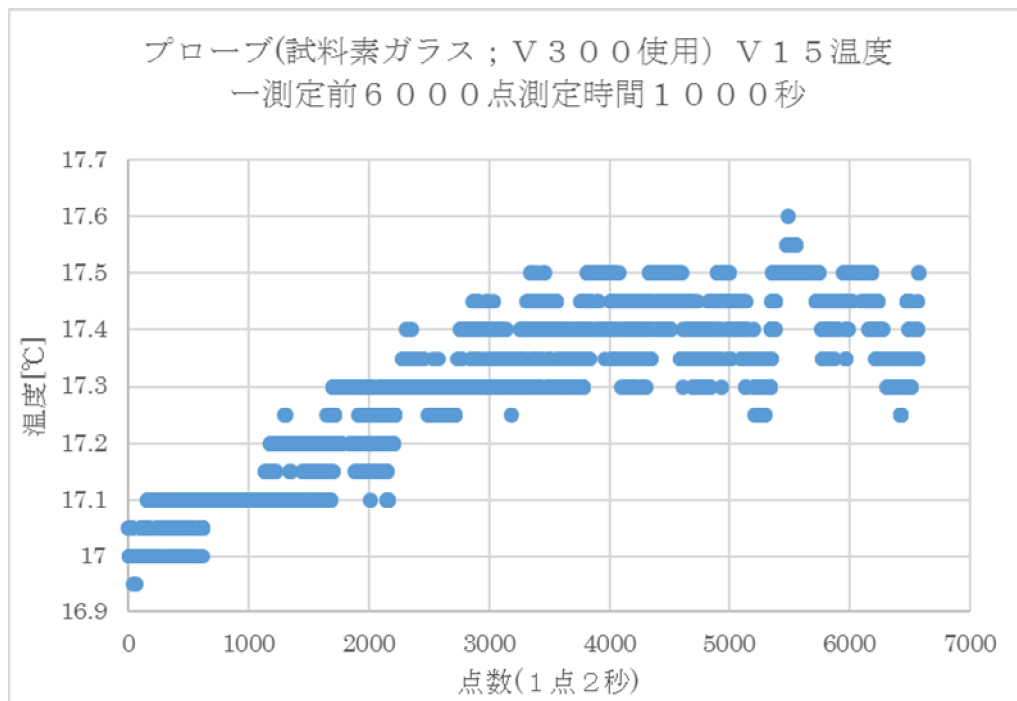


図 3 測定開始前 6000 点 (200 分)、測定開始後 500 点 (1000 秒) の温度変動

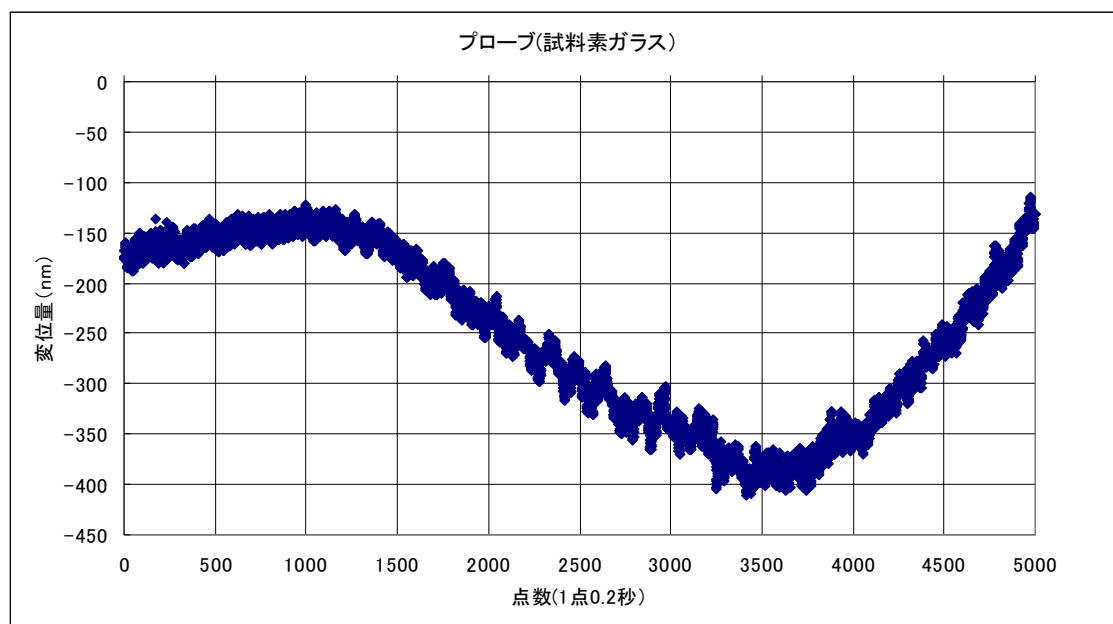


図 4 素ガラス試料表面の変位変動。1000 秒間の計測。図 3 に示す 6000 点から 6500 点までが変位変動を示す時間領域と一致する。温度変動が、0.25 度 V 字型に変動しているが、その温度変

動に対応して変位量が変動している。

温度変動に関して、以下の特性を注記する必要がある。

空調により短時間に温度がスパイク的に変動していることが知れる。空調は 10 分から 20 分間の風量を変動させている。その風量変動の影響が温度変動に現れている。

温度は Pt100 素子を用いて、3 点のベース温度の平均値を用いている。温度分解能が 0.05 度である。これは、温度測定器の精度によっている。

4. 裏面の測定への影響について

測定試料の裏面の影響について議論する。

表面と裏面に試料厚さだけ差があるため、入射光の電場ベクトルに対して、時間的(位相)の差が生まれ、反射光の電場ベクトルは、その強度のみ表すと次式になる。ここで、偏光方向が回転しない(旋光性がない)ことを仮定する。

$$E_S = E_{in} \exp(i\omega t) + aE_{in} \exp(i\omega t + i\phi(t))$$

ここで、 E_{in} は表面から反射された光の電場強度、 ω は光の角振動数、 a は裏面からの反射強度減衰率、 ϕ は裏面からの反射光の試料厚さによる位相のずれである。位相ずれは様々な要因で時間の関数である。簡単のため、 E_{in}, ω, a は時間に依存しないと仮定する。

この反射光が、ビート信号を作るための参照光 (の電場ベクトル)

$$E_R = E_{ref} \exp(i(\omega + \omega_B)t + i\phi)$$

と合波する。ここで、 ω_B はビート周波数、 ϕ は位相差である。2 つの光の合波後、信号 SIG が作り出され、次の式で与えられる。

$$SIG = |E_S + E_R|^2$$

$$= const + \text{Re}(E_{in} \cdot E_{ref}) \cos(\omega_B t + \phi) + \text{Re}(aE_{in} \cdot E_{ref}) \cos(\omega_B t + \phi - \phi(t)) + \text{Re}(aE_{in}^2) \cos(\phi(t))$$

ここで、 $const$ は時間変動成分を持たない定数である。第 2 項は表面からの反射に基づく信号成分、第 3 項は裏面からの反射光に基づく信号成分、第 4 項は表面と裏面の干渉による信号成分である。以下干渉成分を無視して議論する。

2 つの正弦波が位相を異にして重なっている信号に対して、光ヘテロダイン測定は何を基準にして変位量を求めているかが問題になろう。様々な方法があるが、最もわかりやすい方法はゼロクロス方法、初期位相方法である。

ゼロクロス方法

信号がゼロ値を切った時刻を次々と求め、そのゼロクロス時刻を処理することで、その信号の周波数の変動が知れる。この周波数シフトは、ドップラー効果によるとして、移動速度と変位量を求める方法。

初期位相方法

一定時間間隔でゲートを設け、そのゲート時刻での位相を求める方法。位相は、ゲート時刻付近の一周期の長さとの関係で求める。このゲート時間ごとの位相変動より変位量を求める方法。

どちらの方法をとっても、ゼロクロス点・位相の変動は変位量の誤差を生む。

第2項に対し第3項の a 値、及び、 ϕ 値を変えて信号の変動を計算すると波形は歪む。

例として、 a 値=0.3の場合につき、 ϕ 値= $2\pi \times 0.15$ 、 $2\pi \times 0.25$ 、 $2\pi \times 0.45$ 、の値の場合の変動を図5に示す。

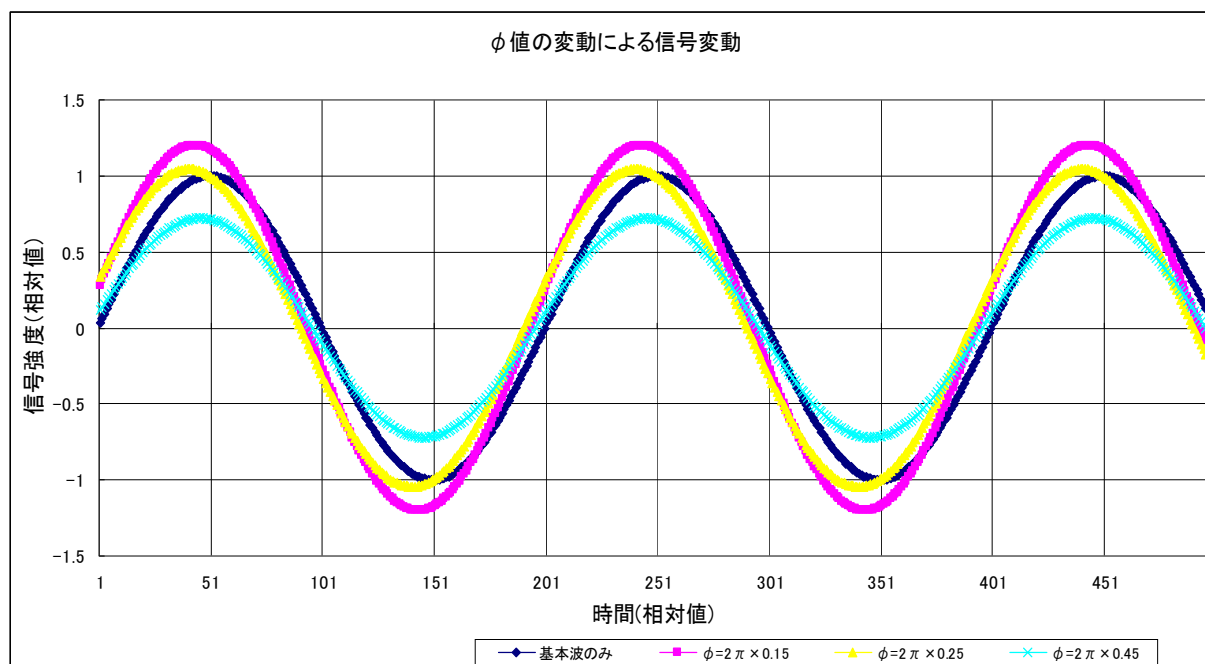


図5 裏面からの反射寄与がない場合に対する、裏面反射の影響による信号の位相変動(計算グラフ)

裏面からの反射影響が常に一定ならば、基本波とは一定の位相シフトに収まるので問題は発生しない。しかし、表面からの反射が揺らぐように、裏面からの反射も揺らぐ。基本波の位相変動は表面の(真値の)変位量を求めうることに對して、裏面の揺らぎがもたらす位相変動は変位量のエラー成分を含むことになる。半周期が(HeNe レーザの場合で反射測定の場合) 633nm の長さに相当する。図は ϕ の値によっては、 $1/10$ 程度の変位量変動、すなわち 63nm 、を発生させることを示唆している。

この値は、精密測定、縦分解能 1nm を議論する際には極めて大きな問題を含むことを示す。これにより、裏面からの反射は制御しなければならないことが知れる。図5は ϕ 値の変動のみを示したが、 a 値の変動でも同様な結果をもたらす。

結論として、裏面からの反射は重要な測定阻害要因である。

5. 考察・反省

光学接着剤を4種購入して、実験を行った。今回の測定では、わずかな屈折率の差までは、測定値に反映しなかった。それだけ、屈折率差に差がないことで、反射光が極めて少ないことによると思われる。

裏面反射の影響削除の方法として有効な手段を確認した。

プローブ製作の問題点と今後の試作のために反省が必要な事項は以下の点である。

- ① プローブ内の機械材料の剛性、ファイバーへの応力拡散
- ② プローブの小型化への光学部品へのサイズ変更
- ③ プローブ内の光路調整に役立つ専用ジグの作製
- ④ 顕微鏡搭載以外の場合に、レンズ系は CCTV レンズ系で良いのか。