レーザーオリジナル

20℃～60℃におけるエドレンの式の実験的検討

清水 嘉彦^{*}・秋 元 義 明^{**}・谷 村 吉 久^{**}松 本 弘 一^{**}・岡 本 炳 人^{***}

(1991年12月5日 受理)

Experimental Study on Edlén's Equation in the
Temperature Range from 20℃ to 60℃Yoshihiko SHIMIZU^{*}, Yoshiaki AKIMOTO^{**}, Yoshihisa TANIMURA^{**}Hirokazu MATSUMOTO^{**} and Akito OKAMOTO^{***}

(Received December 5, 1991)

Edlén's equation which is available for determining the refractive index of air around 20℃ in length measurement, was experimentally studied in the temperature range from 20℃ to 60℃. The experiment were made by using a fringe-counting He-Ne laser interferometer and meteorological sensors. The difference between the air refractive indices derived from the interferometer and Edlén's equation was estimated to be about 2×10^{-6} at an air temperature of 60℃.

Key Words : Edlén's equation, Refractive index of air, Interferometric length measurement.

1. はじめに

レーザーは、その優れた時間的コヒーレンスに注目され、長さの精密計測用光源として多く活用されるようになった。特に、レーザー干渉測長システムが実用化されて以来、産業界では高密度デバイスや複雑な形状の加工機などに干渉計を直接取りつけ、実時間で自動計測を行うと共に、位置の自動制御およびNC加工などにも利用しているのが現状である。

光波を活用した長さ測定では、空気の屈折率の算出にエドレンの補正式を用い、測定環境に基づいて測長値の補正が行われている。エドレンの補正式は、一般に12℃から30℃の温度範囲で適用できることが知られている。しかし、機械加工等の作業現場の測定環境条件は厳しく、空気温度が30℃を越えることがよくある。

本論文では、適用温度範囲を越えた場合のエドレンの補正式の振る舞い、および実測値との相違についての比較検討結果を述べる。

* 計量研究所大阪計測システムセンター (〒530 大阪市北区扇町2-6-20)

** 計量研究所 (〒305 つくば市梅園1-1-4)

*** 和泉電気株式会社 (〒532 大阪市淀川区三国本町1-10-40)

* National Research Laboratory of Metrology (Osaka Measurement System *Center, 6-20 Ohgimachi 2-chome, Kita-ku, Osaka 530)

** National Research Laboratory of Metrology (1-4, Umezono 1-chome, Tsukuba, Ibaraki 305)

*** IDEC Izumi Co. (10-40, Mikunihonmachi 1-chome, Yodogawa-ku, Osaka 532)

2. 測定原理

マイケルソン干渉計の参照軸と測定軸の長さを、それぞれ l_1 , l_2 と仮定する。空気の屈折率 n_1 における光路差 ΔL_1 は,

$$\Delta L_1 = 2n_1(l_1 - l_2) \quad (1)$$

である。次に、参照軸の空気の屈折率を一定に保ち、測定軸の屈折率を n_1 から n_2 に変えると光路差 ΔL_2 は,

$$\Delta L_2 = 2(n_1 l_1 - n_2 l_2) \quad (2)$$

に変化する。よって、測定軸の空気の屈折率変化に伴う光路長の変化 ΔL は,

$$\Delta L = \Delta L_1 - \Delta L_2 = 2l_2(n_2 - n_1) \quad (3)$$

で与えられ、干渉測長においては空気の屈折率変化に基づく計測誤差になる。したがって、空気の屈折率変化に伴う光路長の変化は、マイケルソン干渉計の測定軸に、たとえば長さ l_2 のガラスセルを配置し、空気の屈折率の状態を変えることにより測定できる。

空気の屈折率 n は、空気の温度 T (°C)、空気の圧力 P (Pa) 水蒸気圧 V_p (Pa)、の関数で表されるエドレンの補正式で与えられる^{1, 2)} :

$$n = a \cdot P \left\{ \frac{1 + c \cdot P (d - e \cdot T)}{1 + b \cdot T} \right\} - f \cdot V_p + 1 \quad (4)$$

ここに、 a, b, c, d, e および f は定数であり、これらの定数は標準空気 (気温20°C, 気圧101.325

kPa, 水蒸気圧1333Pa) でHe-Neレーザー波長632.8197 nmにおいて計算すると、それぞれ

$$a = 2.877934 \times 10^{-9},$$

$$b = 0.003661,$$

$$c = 7.500637 \times 10^{-9},$$

$$d = 0.817,$$

$$e = 0.0133$$

$$f = 4.206615 \times 10^{-10}.$$

になる。

3. 実験

3.1 実験装置

実験装置は、レーザー干渉測長計、空気の温度制御を可能にしたガラスセル部、温度・湿度・気圧測定のためのセンサー、および、それらの計測器で構成されている。

実験に用いたレーザー干渉測長計は、発振波長633 nmの安定化He-Neレーザーと偏光成分間位相差干渉法を採用したマイケルソン干渉計で構成されている。この測長計の性能は、光源の波長安定性が約 10^{-8} 、測定確度が $\pm 1 \times 10^{-7}$ 、分解能が $\lambda/16$ 、測定範囲が5 mである。干渉計の部分は、Fig. 1に示すように、線膨張係数が $10^{-7}/^\circ\text{C}$ の2本のスーパーインバー製のスペーサに固定した。そして、これらのスペーサは、2個のステンレスブロックで固定して光学ベンチに載せられた。

長いガラスセルを用いることによって、空気の屈折率変化に伴う干渉計の検出感度は向上する。しかし、本研究では、セルの断熱、光学ベ

Fig. 1 Experimental Setup.

ンチの熱膨張および機械的強度を考慮し、ガラスセルの長さを1500 nmにした。セルは、外径60 nmのパイレックス製のガラスチューブに厚さ10 mmのBK7製の窓材をOリングを介して取り付け付けた構造にした。このような構造を採用したことによって、セル内空気は約0.1Paまで減圧が可能であった。

セル内空気の温度は、長さ5 mのリボンヒータをセルの外壁に巻き、セル中央部に張り付けた熱電対で温度変化を検出することによって、実験条件に合わせ設定温度に制御されている。さらにガラスセルは、温度の安定性を向上させるために厚さ50 mmのロックウールで保温されている。このガラスセルは、干渉計の測定軸に配置され、光学ベンチに直接固定されている。

セル内の温度分布は、熱容量の小さい5本のサーミスタをFig. 1 に示すように、干渉計の光軸の近くに配置 ($Th_1 \sim Th_5$) して測定した。さらに、測定精度の向上を目指し、セル窓面 (Th_7, Th_8)、セル両端の窓の外壁とコーナーキューブと干渉計の間の空気の温度 (Th_9, Th_{10})、および、スぺーサ上の2箇所 (Th_{11}, Th_{12}) の温度をそれぞれサーミスタで測定した。これらの温度測定の精度は、全て $1/100^\circ\text{C}$ である。

水蒸気圧は、測定確度 $\pm 2\%$ RH、分解能 0.1% RHのデジタル湿度計で相対湿度を測定し、計算により求めた。また空気の圧力は、測定精度 133Pa の半導体圧力素子で測定した。これらセンサーおよび測定器の出力は、GP-IB汎用インターフェイスを介してパーソナルコンピュータに導き、自動計測すると共に、収集したデータを目的に合わせ処理した。

Fig. 2 は、ガラスセル中央部の温度を 20°C (■), 30°C (○), 40°C (▲), 50°C (□) および 60°C (●) に設定したときのセル内温度分布の実測値である。また曲線は、測定値に2次関数を最小自乗法でカーブフィッティングした結果である。図から明らかなようにセル内温度は、中央部から窓に近づくしたが、設定温度より低くなる傾向にある。これは、セルの窓面付近の断熱を充分に行うことができなかったためである。

Fig. 2 Temperature distribution of air in a glass cell.

Fig. 3 Aspect of a air in a glass cell for temperature change from 20°C to 60°C .

- (A) Temperature change,
- (B) Pressure change
- (C) Water vapor pressure change

Fig. 3 は、セル内温度を 20°C (実線) に設定し、セル内空気の温度が十分安定になるのを待ち、設定温度を 60°C (点線) に上昇させたときのセルの内部と外部の空気温度 (A)、空気の圧力 (B) および水蒸気圧 (C) の経時変化を示す。セル内温度は、Fig. 3 - (A) に示すように約30分で、ほぼ設定温度に到達し、 $\pm 1/100^\circ\text{C}$ の安定性を保つことができた。また、セル内空気の圧力は、Fig. 3 - (B) に示されるように、温度が変化しても $\pm 0.05\text{kPa}$ 以内で一定に保たれて

いることが明らかになった。これは、系統誤差を測定するためにセル内を真空にする実験を除き、各種センサーの挿入口を開放状態にしたため、膨張したセル内空気が自由に外に流出したためである。

一方、セル内の水蒸気圧は、セル内温度上昇と共に急激に変化するが、温度上昇開始後130分程度ではほぼ一定になることが分かった。しかし、水蒸気圧の値は、温度上昇開始直前より程度下がる傾向にある。したがって、水蒸気圧の変化について、式を用いて屈折率の補正を行った。

これらの結果より、設定温度を変えることによってセル内空気の温度、圧力および水蒸気圧力が安定になるまでの所要時間はそれぞれ異なることが明らかになった。よって、光路差変化の測定は、セル内温度の設定値を変えてから約2時間後に開始した。

3.2 測定方法

実験は、全て室温 $19.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、湿度60%に制御された恒温・恒湿室で行った。セル内温度は、 20°C を基準に 10°C 間隔に 60°C まで上昇させた。エドレンの補正式の評価は、空気の温度変化を測定し、測定誤差 ΔL_e を推定する方法を採用して行った。よって ΔL_e は、次のようにして求めた。すなわち、

- ①Fig. 2に示したセル内空気の温度を長さ方向に30等分に分割し、
- ②各区間の平均推定温度は、カーブフィッティングで求めた2次関数 $T(x)$ を用いて台形近似から求めた。
- ③式(4)に示したエドレンの式に代入して屈折率補正を行い
- ④屈折率変化に基づく光路長変化を次式から求めた。

$$\Delta L_e = 2(l_c \cdot (n_2 - n_1) + \delta l_b + \delta l_w + \delta l_a) \quad (5)$$

ここに、 δl_b 、 δl_w 、および δl_a は、それぞれ干渉計の測定軸の長さ変化、セル窓材の屈折率変化に伴う光路長変化、そして、セルと干渉計とコー

ナキューブ間の空気の屈折率変化に伴う光路長変化であり、 l_c はセルの長さ変化である。

適用範囲を拡張したときのエドレンの補正式の有効性は、式から求めた値(ΔL_e)とレーザー干渉測長計を用いて実測した結果(ΔL_m)との差：

$$\delta L = \Delta L_e - \Delta L_m \quad (6)$$

を基に評価した。

4. 実験結果と検討

エドレンの補正式を介して推定した光路長の変化は、気温 T 、気圧 P および水蒸気圧 V_p を代入し計算した後、次の補正を行った：

- ①スぺーサの熱膨張補正；温度変化 ΔT に伴うコーナーキューブの移動距離は、

$$\delta l_b = \alpha l_n \Delta T \doteq \alpha l \Delta T$$

から推定した。ここに、 α と l はそれぞれスぺーインバーの線膨張係数とレーザー干渉測長計の測定軸の長さ、 n_a は空気の屈折率を示す。干渉計を載せたスぺーサの表面温度は、セル内空気の温度を 60°C に設定した場合でも、良好な断熱効果によって 19.63°C から 20.63°C に上昇するにすぎなかった。

- ②セル窓材の温度変化に伴う補正；セルの窓材に用いたBK7の温度変化 ΔT に伴う補正³⁾は、

$$\delta l_w = l_t \Delta T \left\{ \frac{dn}{dT} - (n-1) \alpha_w \right\}$$

から推定した。ここに l_t および α_w は窓材の厚さと膨張係数を示す。セルの窓材に用いたBK7の屈折率と温度係数 dn/dT は、 632.8 nm においてそれぞれ 1.51509 と $2.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ である。また、熱膨張係数は 7.2×10^{-6} である。

- ③ガラスセルの窓面とコーナーキューブおよび窓面と干渉計の間の空気の屈折率補正；Fig. 1に示したサーミスタ Th_9 と Th_{10} で測定した温度変化をエドレンの補正式に代入し屈折率を求め、

$$\delta l_a = l_a (n_2 - n_1)$$

を用いて推定した。ここに、 l_a はセルの両窓面とコーナーキューブおよび干渉計との光路長の和である。

この他に補正を必要とする要素として、セルの熱膨張に伴う光路長変化が考えられる。この推定値は、セルの温度を60℃に上昇させたとき5 nmであり、①から③に示した補正値に比較して数十分の1に相当する。よって、この補正は、測定誤差以内として扱い式(5)では考慮しないこととした。Table Iは、①から③の補正値の推定結果である。

Fig. 4は、エドレンの式より求めた光路長の変化 ΔL_e (●)と干渉計で実測した光路長変化 ΔL_m (○)である。 ΔL_e (●)と ΔL_m (○)差は、平均空気温度30℃で3.5 μm 程度存在し、57℃では9.5 μm になった。エドレンの補正式は、推定誤差が30℃で 1×10^{-7} 以内であることが保証されている。しかし、この実験から得られた値は、推定誤差は 2.0×10^{-6} であり多少大きい。よって、セル内を減圧し、測定系の系統誤差を実験的に求めた。

ガラスセルを真空にして測定したときの光路長変化は、30℃で6 μm 、また57℃では約14 μm であった。この光路長変化が、測定系の系統誤差に相当する。

系統誤差は、式(5)に示した各項目とアップの誤差である。アップの誤差を除いた系統誤差は、Table Iに示すように60℃で1.21 μm 程度である。これに対し、アップの誤差が大きかった。これは、2本のスペーサを固定したステンレスブロックが、Fig. 1に示すように直接光学ベンチに接しているためである。すなわち、アップの誤差は、光学ベンチの熱膨張によりステンレスブロックに取り付けた干渉計とコーナーキューブが内側に倒れ込み発生したものと考えられる。

エドレンの補正式は、空気温度が30℃までは 1×10^{-7} 以内で推定誤差が保証される。しかし、系統誤差を考慮すると推定値は、たとえば、57℃、1.5 mのとき3.0 μm 程度小さくなり、温

Table I Estimated errors at the temperatures of 30℃, 40℃, 50℃ and 60℃.

T	0℃	40℃	50℃	60℃
$\delta l_b / \mu\text{m}$	+0.02	+0.04	+0.11	+0.16
$\delta l_w / \mu\text{m}$	+0.26	+0.64	+0.13	+1.54
$\delta l_a / \mu\text{m}$	-0.10	-0.22	-0.35	-0.49
Total	+0.18	+0.46	+0.79	+1.21

δl_b : thermal expansion of a spacer,

δl_w : length change depending on refractive index variation of cell-windows,

δl_a : length change depending on refractive index variation of air among an interferometer and both windows of cell.

Fig. 4 Experimental results as a function of temperature.

● : Values due to Edlén's equation

○ : Values due to interferometric measurement

度上昇と共にその誤差は大きくなる傾向にある。したがって、エドレンの補正式は、30℃から57℃の温度領域においては、5℃につき 3.7×10^{-7} 程度補正することが必要である。

5. まとめ

エドレンの空気の屈折率補正式は、空気の温度が30℃まで実験値と補正値が 1×10^{-7} の精度以内で一致した。しかし、適用範囲以上に温度範囲を拡張すると、たとえば空気温度60℃では実験値との差が1.5 mの長さで3.0 μm 程度

(2.0×10^{-6}) になり, 実験値と離れる傾向にある。したがって, 干渉測長計で長さ計測を行う場合, 測定環境を 30°C 以下に抑えること, および 30°C 以上ではエドレンの式から得られる値に, 5°C 上昇ごとに 3.7×10^{-7} だけ補正することが必要である。

本研究を遂行するに際し, 内山英樹計量教習所長(元大阪支所長)にご協力を得た。紙面をもって感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) B. Edlen : Metrologia 2 (1966) 71.
- 2) J.C. Qwens : Applied Optics 6 (1967) 51.
- 3) 田幸, 辻内, 南編 : 光学的測定ハンドブック (朝倉, 東京, 1981年) p.61.