

光波距離計における大気定数の測定と考察*

堀 信 男

東京光学機械(株)研究開発部 〒174 東京都板橋区蓮沼町 75-1

(1983年8月10日受理)

Measurement of the Atmospheric Constant by EDM

Nobuo HORI

Technical Research & Development Division, Tokyo Optical Co., Ltd.,
75-1, Hasunuma-cho, Itabashi-ku, Tokyo 174

Utilizing electro-optical distance meter (EDM) and the distance equation which is the effective means to design EDM, we determine the atmospheric constant in the measuring range of EDM. Then we calculate the attenuation constant in the visible wavelength region, and show the correspondence between these experimental values and meteorological range.

1. はじめに

光波距離計 (以下 EDM と称する) の測定原理は, 光源から射出される光を強度変調し, この光波を測定距離の間で往復させる. そして射出光と反射光の位相関係から測定距離を知る. しかし, 射出した光は大気の影響を受け, 測定距離が増すに従い受光光量は減少していく. やがて最低感知能力以下の光量しか戻ってこなくなったとき, その EDM は測距不可能となる. この最高測定距離のことを EDM の到達距離と呼び, EDM 性能の重要な要素となる.

EDM における距離方程式とは, 設計段階でこの到達距離を設定し, そこから各要素を決定していくために用いられる. 各要素とは, 次に示すものである.

- (1) 発光のエネルギー密度
- (2) 受光部の感度 (最低感知能力)
- (3) 受光系対物レンズの口径
- (4) 反射鏡 (コーナークューブ) の大きさと個数

EDM の各社カタログでは, 気象状態と反射鏡の個数をパラメータとして到達距離の予測はされていても, その気象状態は定量的物理量としては記載されていない. したがって今回の実験目的は, EDM を用いて逆に実際の大気の減衰係数を測定することであった. 以下では, 大気の減衰係数 (以下大気定数と称する) の測定方法と測定結果について報告する.

2. 大気定数の測定と結果

従来の距離方程式^{1,2)}では, 要素(4)における反射鏡の精度上のばらつきが考慮されていない. 大気定数を測定するために距離方程式を解くならば, 各反射鏡の精度による光量ロス (効率低下) も考慮しなければ, 実験から得られる大気定数は, 純粋な大気定数よりも大きな値をもつことになるであろう.

2.1 大気定数測定のための距離方程式

そこで, 今回大気定数測定のために用いた距離方程式は反射鏡の精度も考慮し, 射出光量 Φ_0 に対する受光光量 Φ' の結合効率 C_0 を求める形式で次のように表わした.

$$C_0 \equiv \Phi' / \Phi_0 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{MS_c}{R^2 \theta^2} \cdot A_0^2 \cdot F^2(R, f_c, \alpha, h, S_{ob}) \cdot \exp(-2\beta R) \quad (1)$$

ただし, R : 測距距離, θ : 対物レンズから出る光のビーム幅, S_c : 反射鏡1個の面積, M : 反射鏡の個数, A_0 : 装置定数.

そして, β が求めようとする大気定数であるが, 注意すべきことは, この β は EDM の使用波長での減衰係数ということである. 今回われわれが用いた EDM の使用波長は $\lambda=820$ nm である.

$F^2(R, f_c, \alpha, h, S_{ob})$ が反射鏡の精度を考慮した反射鏡-受光対物間のビームの拡がり起因する結合効率を示す. **Fig. 1** には, この結合効率の算出方法の概略図を示す. したがって, 反射鏡の偏角 α , 反射率 h の関数

* 第8回光学シンポジウム (1983年6月20日, 東京) において講演

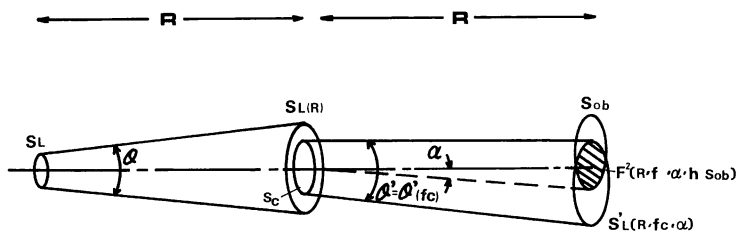


Fig. 1 Schematic of the coupling efficiency F^2 calculation.

であるとともに、測定距離 R 、受光対物面積 S_{ob} の関数でもある。また f_c は、反射鏡による波面の変化を焦点距離に換算したものであり、実験の際にはあらかじめ、 h 、 α 、 f_c は測定しておかねばならない。

測定地点に複数個の反射鏡を設置する場合には、おのおの α 、 f_c の値が異なるから、トータルの F^2 は、

$$F^2 = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M F_k^2(R, f_{ck}, \alpha_k, h, S_{ob}) \quad (2)$$

で表わせる。

距離 R_1 での反射鏡の数を M_1 、 F^2 を F_1^2 と書けば、(1)式は

$$\frac{\Phi_1'}{\Phi_0} = \frac{4}{\pi} \frac{M_1 S_c}{R_1^2 \theta^2} A_0^2 F_1^2 \cdot \exp(-2\beta R_1) \quad (3)$$

と書ける。同様に距離 R_2 においても(3)式のように書けるから、それらの比をとって

$$\frac{\Phi_2'}{\Phi_1'} = \frac{M_2 F_2^2}{M_1 F_1^2} \frac{R_1^2}{R_2^2} \cdot \exp\{2\beta(R_1 - R_2)\} \quad (4)$$

が得られる。実際の EDM においては、受光光量を光電変換し、さらにそれを定倍増幅した電圧値 S を取り出すことができるから、(4)式の左辺は、 $\Phi_2'/\Phi_1' = S_2/S_1$ で表わせ、ゆえに(4)式は、

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{M_2 F_2^2}{M_1 F_1^2} \frac{R_1^2}{R_2^2} \cdot \exp\{2\beta(R_1 - R_2)\} \quad (5)$$

と書け、これが大気定数測定の基本式となる。

もし、同一距離を反射鏡の個数を変えて出力電圧を測定したならば、 $R_1 = R_2$ より(5)式は、

$$S_2/S_1 = (M_2 F_2^2)/(M_1 F_1^2) \quad (6)$$

が成立しなければならない。Fig. 2 に、同一距離において、出力電圧値の変化を、横軸に $(M \cdot F^2)$ をとりプロットしたものを示す。

○印は、2~3分間の測定時間内で最も頻度の高く現われた出力電圧値を示したものであるが、大気のゆらぎの影響を受け、測定値にばらつきが生じている。ゆえに出力値の信頼度を増すため、反射鏡の個数を何度も変えて測定し、(6)式を満たすように最小二乗法を用いて補正を行ない(Fig. 2 の *印) その値を用いて大気定数を算

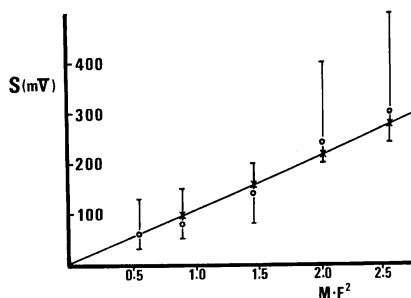


Fig. 2 Measured (○) and corrected (*) output voltage of the EDM.

Table 1 Experimental values of the atmospheric constant between each measuring point at Arakawa river side on July 8, 1981.

Point	Distance R (km)	β_{ij} (km^{-1})
1	1.1959	$\beta_{12} = 0.251$
2	2.2262	
3	3.4128	$\beta_{23} = 0.161$

Table 2 Experimental values of the atmospheric constant between each measuring point at Tonegawa river side on Mar. 11, 1982.

Point	Distance R (km)	β_{ij} (km^{-1})
1	3.016009	$\beta_{12} = 0.12731$
2	4.624370	
3	5.868908	$\beta_{23} = 0.12787$
4	6.971941	$\beta_{34} = 0.12664$

出した。すなわち、(5)式より

$$\beta_{ij} = \frac{1}{2 \cdot (R_i - R_j)} \cdot \ln \left[\frac{S_i^* M_i F_i^2 R_i^2}{S_j^* M_j F_j^2 R_j^2} \right] \quad (7)$$

ここで i, j は各ポイントを示し、 β_{ij} はポイント i, j 間での平均大気定数を示すことになる。

2.2 測定結果

具体的に、測定された大気定数の一例を Table 1, 2 に

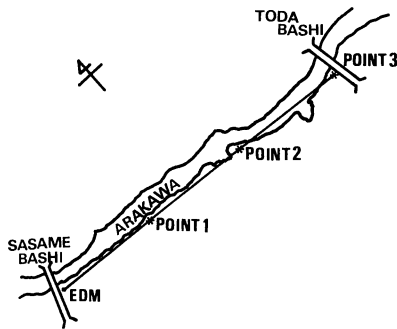


Fig. 3 The situation of points 1, 2, 3 and EDM at Arakawa river side on July 8, 1981.

Table 3 Average of the atmospheric constants at $\lambda=820$ nm.

Date	Place	β (km^{-1})
1981. 7. 11	Uenohara	0.141
1981. 7. 28	Arakawa	0.206
1981. 8. 4	Tonegawa	0.494
1981. 9. 1	Uenohara	0.457
1981. 12. 26	Arakawa	0.845
1982. 2. 3(13:00)	Tonegawa	0.489
1982. 2. 3(16:00)	Tonegawa	0.332
1982. 3. 11	Tonegawa	0.127

示す。

測定の際、各ポイントにおいては前述の理由から、反射鏡の数を1個から9個まで変えて測定したが、距離が増すに従い、少ない個数の反射鏡では測距が不可能となる。Table 2のポイント3では2個以下、ポイント4では6個以下の反射鏡の数では測距が不可能であったため、出力値は得られても、 S/N の関係から測定値としては扱わなかった。また、2.1節で述べたように出力電圧が揺らいているため、最頻値の電圧から補正して β 値を算出したが、最大・最小の出力電圧から β 値を算出して、その測定精度を調べてみると、 $\pm 0.05 \text{ km}^{-1}$ 以内であった。

Table 2に比べて、Table 1の β_{ij} 間に差がありすぎる理由としては、測定間隔の中に川面を狭んでいたことに起因する(Fig. 3)。すなわち、ポイント1と2の間では、ほこりなどによる光の散乱が影響していると思われるが、2と3の間ではそれが軽減されたと考える。一方、利根川岸での実測では、川面を狭む箇所はなくポイント間での大気定数に差が生じなかったと考える。

以上のようにして求めた、これまでの大気定数 β の測定値を列挙すると、Table 3のようになる。ここで β

は $\lambda=820$ nmにおける最長ポイント間での平均値を示す。

3. 大気定数と視程

大気定数 β は、大気の単位長さを通過する光のうち、どのくらい減衰するかという減衰係数を表わした。それを詳しく分類すると、(1)清浄な空気中でも起こりうる空気分子(N_2 , O_2 , CO_2 など)によるレーリー散乱、(2)微粒子(雨・霧・もやなどの水滴、煙、ほこりなど)によるミー散乱、(3)空気分子や水蒸気による吸収、から成り立つ。したがって、減衰係数 β は散乱係数 b と吸収係数 k の和で表わせる。ところが、実際の大气では可視光に対しては k は非常に小さく、光はほとんど散乱によって減衰する。また波長820 nmにおいても、 H_2O , O_2 分子の吸収帯からはずれていて、地上付近の大气中で水平に観測する際には、吸収の影響はほとんど無視できる。

ミドルトン³⁾は、実際の大气中における波長 λ の光の減衰係数 $\beta(\lambda)$ に対して、次式を与えている³⁾。

$$\beta(\lambda) = c \cdot \lambda^{-\eta} \quad (8)$$

清浄な大気、すなわちレーリー散乱の場合 $\eta=4$ の値をとり、霧の場合 $\eta=0$ であり、このとき $\beta(\lambda)$ は波長によらず 2.5 km^{-1} の値をもち、その他の場合は $0 < \eta < 4$ であり、大気の混濁の程度が高いほど η の値は小さくなり、波長による差も小さくなる。これらのことを、 η 値をパラメータとして $\beta(\lambda)$ 曲線を描くとFig. 4のようになる。この曲線の関数型は、手許の η と $\beta(\lambda)$ の既知のデータから、近似的に、(8)式の中の定数 c を、

$$c \approx a_0 \exp(b_0 \eta) \quad (9)$$

と置いたものである。

したがって、(8)、(9)式を用いて、 $\beta(820 \text{ nm})$ の測

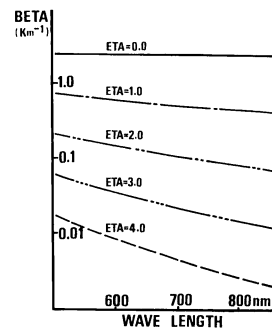


Fig. 4 Atmospheric constant as a function of the wavelength.

Table 4 Experimental values β (820 nm) and calculated values η , β (550 nm) and L_v from Eq. (8)-(10).

β (820 nm)	η	β (550 nm)	L_v (km)
0.141	1.665	0.273	14.3
0.206	1.444	0.367	10.7
0.494	0.938	0.719	5.4
0.457	0.983	0.676	5.8
0.845	0.627	1.086	3.6(3.4)
0.489	0.944	0.712	5.5(7.0)
0.332	1.168	0.529	7.4(9.0)
0.127	1.722	0.253	15.4

定値から、そのときの大気の混濁度 η がわかり、さらに β (550 nm) の値をも算出することができる。

可視領域の光の減衰係数は、人間が遠くの黒い対象物を見る際、どこまで遠くの物が見えるか、という可視距離 L_v と密接に結び付いている³⁾。すなわち、

$$L_v = \ln(1/\varepsilon) / \beta \quad (10)$$

と表わせる。これが視程 (meterological range) と呼ばれる距離であり、 ε は人間の眼の識別閾値であり、通常 $\varepsilon=0.02$ と規定されている。筆者は、可視領域の光の減衰係数を β (550 nm) で代表し、(10)式を用いて、測定値 β (820 nm) $\rightarrow \eta$ 値 $\rightarrow \beta$ (550 nm) $\rightarrow L_v$ の順に従って視程 L_v を算出してみた。その結果を **Table 4** に示す。第1コラムの β (820 nm) は **Table 3** に示した実測値そのものである。

第4コラムの括弧内の数字は、実際そのときに観測した観測視程を示す。

ただし、ここでの観測視程というものはそれほど正確に測定されたものではない。対象物としては森とか黒っぽい建造物を選び、それらの数箇所の対象物を地図のうえであらかじめ距離を調べて置き、各気象状態において、それらの対象物が見えるか見えないかを判断し、見えた対象物までの距離を観測視程とした。

4. む す び

以上のように、測定された大気定数は観測視程と大まかな一致を見ることができた。しかし、同じような視程のときでも、晴れた日と曇りの日では、EDMの到達距離に差が生じた(曇りの日のほうがたいがい長く測定できる)というような事実から、たとえより精度よく視程が観測されたとしても、その値から EDM の使用波長

Table 5 Classified atmospheric condition (WILD).

Atmospheric condition	
*Poor	—Strong haze with visibility about 3 km —Or very bright sunlight with severe heat shimmer
*Average	—Light haze with visibility about 15 km —Or moderate sunlight with light heat shimmer
*Excellent	—Overcast, no haze, visibility about 30 km —Or no heat shimmer

における大気の減衰係数を算出することは(一応の目安となるが)乱暴なことである。

今回、筆者が大気定数と視程の関係を考察した理由は、通常気象と呼ばれるとき、大気の減衰係数はどの程度の値をもつかを知るためであった。たとえば、**Table 5** に示すように、WILDのEDMカタログでは、気象状態を3段階に分け、通常気象としては視程15 kmを基準にしている。これを、先の(8)~(10)式に従い、EDMの使用波長(800~900 nm)での減衰係数を求めてみると

$$\beta(\lambda) = 0.138 \sim 0.113, \quad \lambda = 800 \sim 900 \text{ nm}$$

程度となる。

筆者の測定実験においては、 β (820 nm)値が0.2以下であったほうが珍しく、WILDの示す標準気象状態は少し清浄すぎる。ヨーロッパの大気の澄み具合がよいのかもしれないが、国内での標準気象状態としては、 β (550 nm) $\approx 0.5 \text{ km}^{-1}$ 程度が妥当のような気がする。

以上述べてきたように、EDMを使用することによりただちに、ポイントごとの距離計測と受光光量に相当する電気信号が得られ、距離方程式から簡単に大気の減衰係数が測定できることを示した。また、一方においては、このようにさまざまな気象状態での大気定数を定量化しておくことにより、到達距離が十分に堅持されたEDMの設計に役に立つものと考えらる。

文 献

- 1) V. H. Leitz: Z. Vermess., Nr. 4 (1977) 152.
- 2) 須田教明: 電磁波測距儀, 改訂版(森北出版, 1976).
- 3) 久保田宏, 浮田祐吉, 會田軍太夫編: 光学技術ハンドブック, 増補版(朝倉書店, 1975) p. 1117.