

研究速報

長距離用測距儀のための光源の選択

松本 弘一

計量研究所 〒305 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4

(1984年8月24日受理)

A Method of Selecting Light Sources for Two-Color Long-Distance-Measuring System

Hirokazu MATSUMOTO

National Research Laboratory of Metrology,

1-1-4, Umezono, Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki 305

Transmissions for various lasers traveling over long distances in the atmospheric air are analyzed. Distance errors in measurement by two-color distance-measuring system using the lasers are estimated from the signal-to-noise ratios of the detected signals. From the results, it became clear that a system using a 1065-nm YAG laser and a 633-nm He-Ne laser is useful for the measurement of long distances such as 50 km.

1. はじめに

最近、おもに地震予知の目的から、50 km 程度の距離を数 mm の精度で1日に1回くらい測定することが求められている。このような高精度な測定には、空気の屈折率を補正できる2波長レーザーとマイクロ波を光源とした多色レーザー測距儀が有効である¹⁾。この場合、数 GHz で変調された2波長のビームの間の位相差を高分解に求めることが要求されるが、この際、大気によるビームのゆらぎや減衰が大きな問題となる。このゆらぎの影響に関しては解析されている²⁾が、ビームの減衰は考慮されていない。ここでは、測距儀への応用が可能なレーザー光源を選択し、大気中でのビームの透過率および検出される信号のSN比を解析し、距離の決定精度について検討した。

2. 大気中での各種レーザーの透過率

測距儀において高分解に距離を求めるため、約 2.7 GHz (約 111 mm の波長) という高周波でレーザービームを結晶などによって変調することが必要である。このような変調には、KDP 結晶が用いられるので、使用できる光源の波長領域は 400~1300 nm に限定される¹⁾。

また、可搬のためコンパクトであり、安定した連続出力が得られることが重要である。このような条件から、**Table 1** に示すレーザーを光源として選択した。 η は光電子増倍管の量子効率、 m は KDP 結晶による変調効率 (一般に、これは波長に逆比例する)、そして、 P_0 は市販されているレーザーの典型的な出力である。光の減衰係数 β は、おもに、大気による散乱と水蒸気による吸収に依存し、散乱係数は波長が長くなると小さくなるのに対し、吸収係数は波長が長くなると大きくなる傾向にある。散乱による減衰係数 β_1 としては、統一的にデータが与えられている米国標準大気表を利用した (**Fig. 1**)³⁾。気象状態は **Fig. 1** に示すように、遠くの物が見える限界を示す可視距離によって定義されている。近赤外領域では、水蒸気による吸収が重要であり、この吸収係数 β_2 として、Eldridge⁴⁾ と Wyatt⁵⁾ らのデータを利用した。これらの減衰係数をもとに、 $\alpha = \exp(-\beta z)$ ($\beta = \beta_1 + \beta_2$, z : 距離) に従って、50 km の距離における各レーザービームの透過率を計算した結果が **Fig. 2** である。この図から、透過率は大きな吸収がなければ波長が長いほど大きいことがわかる。この結果、従来から用いられている 633-nm He-Ne レーザーと 442-nm He-Cd レーザーの他に 515-nm Ar イオンレーザーと

Table 1 Selected lasers and their properties.

λ (nm)	η (%)	m (%)	P_0 (mW)
325 (He-Cd laser)	17	6.8	3
442 (He-Cd laser)	14	5.0	12
488 (Ar ion laser)	13	4.5	40
515 (Ar ion laser)	12	4.3	30
633 (He-Ne laser)	10	3.5	5
820 (Diode laser)	7	2.7	3
1065 (YAG laser)	2.8	2.5	50
1152 (He-Ne laser)	2.6	2.3	3

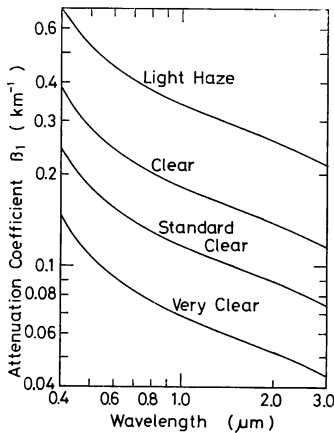


Fig. 1 Attenuation coefficients for various atmospheric conditions.

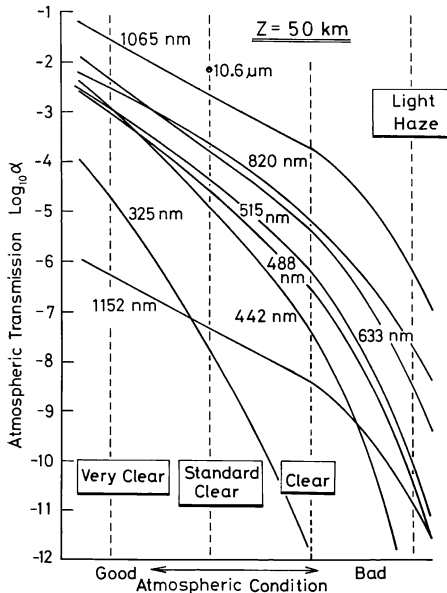


Fig. 2 Transmissions for the selected lasers.

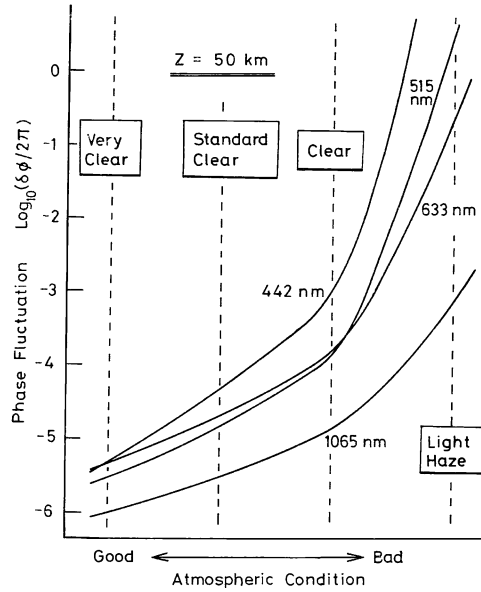


Fig. 3 Phase fluctuations obtained from signal-to-noise ratios.

1065-nm YAG レーザーを測距儀のための光源として選択し、比較した。

3. 距離の決定精度

いま、変調を受けたレーザービーム (波長 λ) を光電検出すると、出力電流は次のようになる。

$$I = I_D + I_0 \{1 + \sin(2\pi M + \phi)\} \quad (1)$$

ここで、 $I_0 = 2m\gamma_1\gamma_2 P_0 G \eta e \lambda \exp(-\beta z) / hc$, M : 自然数, I_D : 雑音電流, γ_1 : ビームの拡がりによる損失, γ_2 : 光学系による損失, e : 電荷素量, h : プランクの定数, c : 光速。

この信号の位相 ϕ は $\sin^{-1}\{(I - I_D - I_0)/I_0\}$ によって求められる。零位法によって ϕ を求める場合、位相の決定誤差は、 $\sin \delta\phi = \delta\phi$ を用いて、簡単に、

$$\delta\phi = N/S \quad (2)$$

によって与えられる⁶⁾。 S と N はそれぞれ信号と雑音の大きさであり、(1)式から $S = \pm \sqrt{2} I_0$, $N = (2eGB)^{1/2} \times (I_0 + I_D)^{1/2}$ であるので、位相の決定誤差は、

$$\delta\phi = (eGBI_0)^{1/2} (1 + I_D/I_0)^{1/2} \quad (3)$$

となる。 **Fig. 3** は位相の決定誤差を各レーザーについて計算したものであり、信号の大きさが雑音の大きさに近くなると急速に誤差が大きくなる。ここで、 $G = 10^6$, $B = 4$ Hz, $\gamma_1 = 2.5 \times 10^{-3}$ そして $\gamma_2 = 0.4$ とした。したがって、2色測距儀による距離の決定誤差は、

$$\delta D = A \lambda_m (\delta\phi_1^2 + \delta\phi_2^2)^{1/2} / 2\pi \quad (4)$$

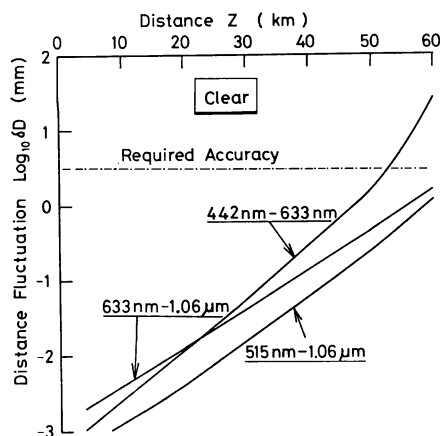


Fig. 4 Distance fluctuations for two-color distance-measuring system.

と導かれる。ここで、 λ_m は変調信号の波長(約 111 nm)であり、 A は $(n_1 - 1)/(n_1 - n_2)$ で与えられる。 n_1 と n_2 は波長 λ_1 と λ_2 における空気の屈折率である。 A の値は 442 nm と 633 nm のセットに対して 20.9, 633 nm と 1065 nm に対して 36.8, そして 515 nm と 1065 nm に対して 20.5 となる。Clear の気象条件において、距離の決定誤差を計算したのが Fig. 4 である。一般に、気象状態は日本のほうが米国よりも悪い⁷⁾ので、従来の He-Cd レーザーと He-Ne レーザーの系では、50 km の距離の測定はかなりきびしいことがわかる。

4. おわりに

10 km 程度までの比較的短い距離用の測距儀のためには、 A 係数を小さくするのに波長の短いレーザーを用いるほうが有利であるが、50 km 程度になると A 係数がいくぶん大きくなっても近赤外レーザー (YAG レーザーなど) を用いるほうが有効であることが明らかになった。

最後に、ご助言いただいた米国国立標準局 (NBS) の J. A. Magyar 博士に感謝する。

文 献

- 1) L. E. Slater and G. R. Huggett: A multiwavelength distance-measuring instrument for geophysical experiments. *J. Geophys. Res.*, **81** (1976) 6299.
- 2) H. Matsumoto and K. Tsukahara: Effects of the atmospheric phase fluctuation on long-distance measurement. *Appl. Opt.*, **23** (1984) 3388.
- 3) S. L. Valley: *Handbook of Geophysics and Space Environments* (McGraw-Hill Book Co., New York, 1965) Chapter 7.
- 4) R. G. Eldridge: Water vapor absorption of visible and near infrared radiation. *Appl. Opt.*, **6** (1967) 709.
- 5) P. J. Wyatt, V. R. Stull and G. N. Plass: The infrared transmittance of water vapor. *Appl. Opt.*, **3** (1964) 229.
- 6) O. J. Raymond: Limiting fringe pointing precision in a scanning two-beam interferometer. *Appl. Opt.*, **9** (1970) 1140.
- 7) 堀 信男: 光波距離計における大気定数の測定と考察. *光学*, **12** (1983) 428.