

多周波レーザーによる大気擾乱と風速の測定について

A PROPOSAL ON WIND-VELOCITY MEASUREMENT USING MULTI-FREQ.-LASERS

後藤 顕也

KENYA GO TO

東京芝浦電気株式会社

総合研究所

TOKYO SHIBAURA ELECTRIC CO., LTD. RESEARCH & DEVELOPMENT CENTER

大気擾乱や風速の測定をレーザー光を利用したドップラーレーザーで行うには、通常、単一周波数のレーザーが必要である。また、レーザー光が大気中を伝搬する際に大気屈折率のゆらぎによる位相面の乱れのためヘテロダイン受信(ホモダイン検波)が難しいこと(信号波と局部発振波の位相面を一致させることによりコヒーレンス条件 $A_r \Omega_r \leq \lambda^2$ を満足させるにはレーザー光の波長が短くなればなるほど不可能に近いほどの困難となる¹⁾)のため可視域・近赤外域でのドップラーレーザーレーザーの計測はほとんどない。さらに、実際の風速の大きさは竜巻や不連続線の移動・動きの速度まで含めて $1 \sim 100 \text{ m/s}$ の範囲内にあることから上記単一周波数発振のレーザー光の周波数安定度を $10^{-9} \sim 10^{-10}$ にしなければドップラーシフトを 10% 以上の誤差精度で測定することはできない²⁾ (表1参照) ドップラー変移周波数 $\Delta \nu = (2) \cdot V \cos \theta / c$ で与えられる。(式1)

表1) $\theta = 0^\circ$, $\nu_0 = 473.612198 \text{ MHz}$ (6329Å He-Neレーザー光) の場合のドップラーシフト周波数 $\Delta \nu$ の計算値

V	具体的速度例	$\Delta \nu$	$\Delta \nu / \nu_0$	誤差精度 10% の測定要す精度
1m/s	3.6 Km/h 人間の散歩時の速さ	3.1596 MHz	6.7×10^{-9}	6.7×10^{-10} , 1×10^{-9}
10 m/s	36 km/h 人間の走る速さ, 船舶の速さ	31.596 "	6.67×10^{-8}	6.67×10^{-9} , 1×10^{-8}
15 "	54 " 普通の自動車の走行速度	47.394 "	1×10^{-7}	1×10^{-8}
30 "	108 " 高速道路上の車の速度	94.788 "	2×10^{-7}	2×10^{-8}
60 "	216 " 新幹線電車の速さ	189.576 MHz	4×10^{-7}	4×10^{-8}
100 "	360 " 弾丸列車, 磁気浮上列車の速度	315.960 "	6.67×10^{-6}	6.67×10^{-7}
300 "	1080 " 超音速ジェット旅客機の速度	947.880 "	2×10^{-6}	2×10^{-7}
1000 "	3.6 Mm/h 超音速ジェット機・戦闘機	3.1596 GHz	6.67×10^{-5}	6.67×10^{-6}
10 Km/s	36 Mm/h ロケット・人工衛星	31.596 GHz	6.67×10^{-4}	6.67×10^{-5}

以上の難点①単一周波数レーザーが必要, ②可視・近赤外域では $A_r \Omega_r \leq \lambda^2$ を満足させることが難しい, ③レーザーの周波数を高安定にしなければならぬ)を克服できる可能性のある新しい方式のレーザードップラーレーザー³⁾が最近、再び注目されたいのでここでは少し具体的に説明する。

在の中の種々の物理量のうち周波数を測定する技術ほど高度に発達し、技術的に確立されているものは他にない。それはマイクロ波測定技術が高度に発達しているせいであり、¹³⁾ Csの9192630770 Hzの周波数標準が存在していることと周波数という物理量は速度や波長とは異なり媒質の屈折率(誘電率)の影響を全く受けないという点にもある。

He-Neレーザー, CO₂レーザーなどのガスレーザーの周波数安定化技術はLamb's dipを利用して安定度1で $10^{-9} \sim 10^{-10}$ 程度も得られるように存在がRuby, Yag, Glassレーザー等と固体レーザーではガスレーザーで行なわれている共振器長のfeedback controlはできない(Lamb's dipのような周波数変移を検出する検出機構がないので), しかし、標準周波数のレーザー光とのMixingを行い、得られたビート周波数を測定することによりガスレーザーの安定度並みに安定さ

せることは原理的には可能である。しかし、装置の価格は極めて高価なものと有り、とても実用に供せられぬと思われる。ここで提案する多周波レーザーによるドップラーレーザーは簡単な装置で上記3つの難点を克服できるばかりではなく、パルスレーザーでドップラーレーザーが可能である点は今後の装置開発上、無視できない特徴である。

ここで提案する多周波レーザードップラーレーザーの光源としては①同時2~3周波数で発振している大出力CO₂レーザー、②大出力TEM₀₀モードCW YAGレーザー、③大出力、CW Arレーザー(但し、単一周波数でなければならない。少くとも同時に2周波数発振している必要がある。)、④高繰返し発振のTEM₀₀モードのYAGレーザー(パルスレーザー)などが考えられる。

YAGレーザーを十分に励起した場合の蛍光の幅($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 光の場合)は最高190 GHzである。レーザー共振器長をモード・ロッフの太めの変調器まで含めて100mmとし、平均屈折率を $N = 1.7$ とし、TEM₀₀モード(単一横モード)のみを発振させたとときの発振周波数を $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$ で表わすと十分に励起した場合には $n \approx 200$ 程度となる。各発振周波数間には

$$\begin{aligned} \nu_n &= \nu_{n-1} + f \\ f &= c / 2NL \end{aligned} \quad (式2)$$

の関係が成り立つ。ここで f は共振器長 L および光速 c と屈折率 N とで与えられるいわゆるレーザー発振のピッチ(間隔)周波数である。レーザー共振器中の変調器の変調周波数をこのピッチ周波数に合わせれば、発振する n 本のレーザーの発振周波数間の位相も変調周波数の位相にロッフされいわゆる強制モード・ロッフの現象が起こる。共振器内の変調器がはくても n 本の発振レーザー周波数間に自然位相同期が起こることもある。(モード・ロッフレーザーといえは、最近では後者の自己位相同期のレーザーを指すことの方が多い。) $c = 299792458 \text{ m/s}$ から(式2)の f は $f = 881742523.5 \text{ Hz}$ となる。但し、この周波数を安定化させるには共振器長を温度制御したり、共振器長を他の手段で測定し、feedback制御により一定に抑える必要がある。

さて、このようにお互いにある一定の f なる周波数間隔をも、 n 本のレーザー(多周波レーザー)を光源として大気中に送光すれば、大気中のエアロゾルからの後方散乱光が受光できる。受光光は

$$P_{nr}(\nu'_n, x) = P_{nc} \left(\frac{c^2}{2} \right) K_0 K_r A_r \beta(\nu_n, x) x^{-2} \exp \left[-2 \int_0^x \alpha(\nu_n) dx \right] \quad (式3)$$

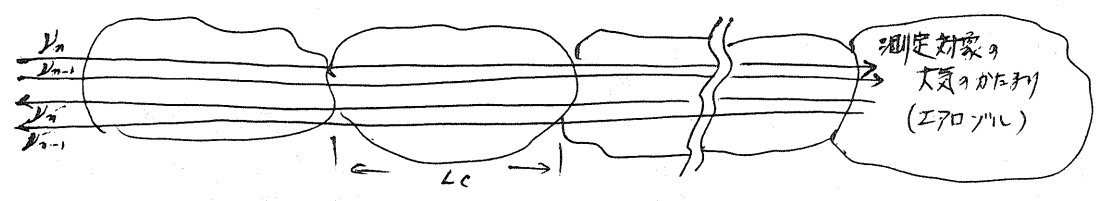
で表わされる。ここで P_{nc} 、 P_{nr} はそれぞれ周波数 ν_n の送信パワーと受信パワー(後述する)に受信光の周波数はエアロゾルの動きによりドップラーシフトを受けているので正確には $\nu'_n = \nu_n + \Delta\nu$ なる受信周波数に変化している)、 $\beta/2$ はレーザー発振持続時間または連続光の場合にはパルス幅の半分、 $c^2/2$ は距離分解能、 K_0 、 K_r はそれぞれ送光、受光光学系の効率、 A_r は受光有効面積、 $\beta(\nu_n, x)$ は後方散乱係数、 x は送受光器と対象エアロゾルまでの距離、 $\alpha(\nu_n)$ は大気による減衰係数を表わしている。一般に $\alpha(\nu_n)$ はMie散乱係数、Rayleigh散乱係数、大気中の分子の吸収による減衰係数すなわち $\alpha(\nu_n) = \alpha_M(\nu_n) + \alpha_R(\nu_n) + \alpha_A(\nu_n)$ に分けられる。しかし、 $\lambda = 1.06417 \mu\text{m}$ で $\delta\nu = 190 \text{ GHz}$ ということは $\delta\lambda = 7 \text{ \AA}$ であるので、この範囲内では $\alpha_A(\nu_n)$ はほとんど零であることが知られており、表3に示すように $\alpha_R(\nu_n)$ は $\alpha_M(\nu_n)$ に比較して無視できる位に小さい。また、 $\delta\lambda = 7 \text{ \AA}$ 程度では β もほとんど変わらない。

さて(式3)で表わされる ν_n なる n 本の送信光パワー P_{nc} を大気中に送射し大気のエアロゾルからの後方散乱光のうち検出器に入射する $\nu'_n = \nu_n + \Delta\nu$ の n 本のドップラー変移を受けた受光パワー P_{nr} は、厳密に言えば対象エアロゾル自体の動きによるドップラーシフトだけでなく送受光器と対象エアロゾルとの間の空間大気の動きによるドップラーシフトも重畳されているわけであるが、幸いにも距離1kmでの光の往復時間(約6.6 μs)程度内では空間中のエアロゾルの急激な変化は無視できるので光の往と復とに受ける途中空間大気の動きによるドップラー変移分は互いに打ち消されてしまうので考慮に入れなくてよいことが本方式の一つの特徴である。また、レーザーヘテロ

ダイナミックレンジが、短波長になればなるほど受信光と局部発振光との位相面の合せの時間変化(大気中を伝搬してくるにより位相面のゆらぎを大きく受けるため)が大きくなり、実際上不可能となる。すなわちヘテロダイン検波ができる条件 $A_r \Omega_r \leq \lambda^2$ (式4)

が成立たなくなることが普通であるが本方式では、いわゆる局部発振器を使わずに大気中の同じ経路を通ってきた二本の異なる周波数 ω 同士を同一光検出面上で混合させるので(式4)のコヒーレンス条件は常に満足することが一番大きな特徴である。すなわち、波長が短くても混合波同士の位相は常にそろっているので Ω_r はほとんど零の値を常に示すことから受光有効面積 A_r を大きくとることができ、S/N向上と送信パワーの低減に大きく寄与させることができる。

大気の相関距離 (Correlation Length) $L_c \approx 10m$, 大気の相関時間 (Correlation Time) $T_c \approx 1msec$ とするのが一般的である。すなわち大気は約10mのかわざりて、約1ms毎に動いていると考えられる。



レーザー・レーザーの送射ビーム方向と対象大気プロックの動きの方向とのなす角を θ とすると送信光の周波数 ω_n に対する受信光の周波数 ω'_n は(式1)より

$$\omega'_n = \omega_n + \Delta\omega = \omega_n \left(1 + \frac{2V \cos\theta}{c}\right) \quad (\text{但し } V \text{ は対象エアロゾルの移動速度}) \quad (\text{式5})$$

で表わされる。また(式2)の関係から $\omega_n = \omega_{n-1} + f$ を用いて

$$\omega'_n = (\omega_{n-1} + f) \left(1 + \frac{2V \cos\theta}{c}\right) \quad (\text{式6})$$

$$\omega'_{n-1} = (\omega_{n-2} + f) \left(1 + \frac{2V \cos\theta}{c}\right) = (\omega_{n-1} + ff) \left(1 + \frac{2V \cos\theta}{c}\right) \quad (\text{式7})$$

(式6)-(式7)より

$$\omega'_n - \omega'_{n-1} = \left(1 + \frac{2V \cos\theta}{c}\right) f, \quad \omega'_n - \omega'_{n-m} = \left(1 + \frac{2V \cos\theta}{c}\right) mf \quad (\text{式8})$$

が容易に導かれる。ここで注目したいことは(式8)の右辺には送信光の周波数 ω_n が入っていないことである。 $m=1$ とした場合(式8)の左辺は多周波レーザーの受信光の隣同士の周波数の差であるので、 m 個の多周波受信光を同時に自乗検波器(光電子増倍管やSi APD フォトダイオード等)に入射させれば $mC_0 = m(m-1)/2$ 個のビート周波数が検出器出力に現われる。しかし、光検出器にはおのずから応答周波数限界があり、光電子増倍管で約1GHz、高速半導体光検出器で数10GHz、(感度を度外視すればN-W点接触フォトダイオードでは約100THz)以上の周波数では応答しない。したがって上述YAGレーザーの場合の $f = 881.7MHz$ の場合でS-1感度の光電子増倍管を光検出器に採用した場合 $m=1$ 個だけのビート周波数が得られる。(これを f_0 とおけば8式は9式のように書き換えられる。)

$$\omega'_n - \omega'_{n-m} \equiv f_0 = \left(1 + \frac{2V \cos\theta}{c}\right) mf = \left(1 + \frac{2V \cos\theta}{c}\right) f \quad (\text{式9})$$

光検出器の出力に現われる f_0 を正確な周波数計で測定し、送信光のピッチ周波数 f をあらかじめ同様の正確な周波数計で測定しておけば(式9)から対象大気エアロゾルプロックの移動速度つまり風速 V は

$$V = \frac{c}{2 \cos\theta} \left(\frac{f_0 - f}{f}\right) \quad (\text{式10})$$

で求めることができる。 $\cos\theta$ は本機を2台、互いに一定距離だけ離して設置し、同一対象エアロゾルにビームを照射させ(レンズ・ゲートをかけるなどして)で得られる情報から求めることができる。その値から風向も求めることができる。

簡単のために $\theta = 0$, $C = 299792458 \text{ m/s}$, $f = 881742523.5 \text{ Hz}$ の場合の f_b を計算によりおめた結果を表2に示す。

(表3) Rayleigh および Mie 散乱係数⁽⁵⁾

(表2) 風速と光検出器出力周波数 f_b と $f_b - f$ の関係

V (m/s)	f (MHz)	f_b (MHz)	$f_b - f$ (Hz)
1	881.7425235	881.7425247	6.2
10	"	881.7425826	59.1
100	"	881.7431116	588.1
300	"	881.7442879	1764.4

(λ) 波長 (μm)	Rayleigh a_λ (km^{-1})	Mie a_λ (km^{-1})		
		V=1 km	V=5 km	V=10 km
0.2	0.70	7.0	22	1.4
0.3	0.14	5.6	1.4	0.84
0.4	0.44	4.7	1.1	0.58
0.6	0.0083	3.7	0.72	0.35
0.8	0.0026	3.1	0.54	0.24
1.0	0.0006	2.8	0.43	0.18
5.0	0.000001	1.1	0.066	0.024
10.0	0.00000006	0.72	0.043	0.010

(V=視程)

表2は光検出器として応答周波数1 GHzのS-1光電面の光電子増倍管を用いた場合の f_b と $f_b - f$ の値であるが、この表から、この場合の中心周波数は f と同じく1 kHz幅はせいぜい1 kHzもあればすべての風速と大気擾乱の情報が見られることがわかる。光検出器としてカットオフ周波数10 GHzの高速Si PINフォトダイオードを用いれば8次の m の値を10程度にまで増大でき、それにより光検出器出力には $f_b, 2f_b, 3f_b, \dots, mf_b$ の合計 m 個の f と f_b の周波数が現われる。したがって光検出器の「次段アンプ」をバンド幅が1 kHzで中心周波数が f_b の tuning amp と ($l=1, 2, \dots, m$ の整数値のうち任意の数) することにより信号処理電子装置のキャリア周波数やバンド幅により任意に選ぶことができる。

以上の説明でわかるように本方式による多周波レーザードップラーレーダーの主要技術はすでに大成されたマイクロ波周波数測定技術に基いている。周波数が f と f_b の近傍にある周波数標準発生器を準備すればまず、レーザ-光発射時の f を f_b を用いて測定し、 $f - f_b$ をおめておき、次に受信信号から得られる f_b を f_b を用いておめることにし、 f と f_b とを f_b の周波数安定度の精度でおめておけば、本方式の光源であるレーザ-周波数 f_b の周波数安定化はもとより単一周波数化も不要であり、かつ、広い面積の受光面盤で光検波ができる画期的なレーザ-速度計ができる。最後に残された問題は f_b の周波数安定度を如何にして 10^9 の精度で実現するかという点とレンジゲートのゲート幅(CWの場合)やレーザ-パルス幅をいくりに設定したら高精度周波数測定ができるかの2点である。前者については現在の技術ではHe-Neの3.39 μm レーザ-を用いて1秒間の周波数変動を 10^{-13} におとせることができる⁽⁶⁾。He-Ne 6329 \AA レーザ-を沃素蒸気の吸収線にロックしてあるいはCO₂ レーザ-の9 μm バンドと10 μm バンドをそれぞれCO₂ の希薄ガスの吸収線にロックさせることにより $10^{-10} \sim 10^{-9}$ 程度に安定化させることができる⁽⁷⁾。安定化させたHe-Neレーザ-の共振器長を17 cmに制御(精度 $10^{-9} \sim 10^{-10}$, 存在方式上述安定化レーザ-を用いる)することにより、ビッチ周波数 $f_b = 881742523.5 \text{ Hz}$ が得られるのでこれを f_b とし、刻々変動する f を f_b に f との差を刻々と電算機に記録させることにより所望の $f_b - f$ の値をおめることができる。後者についてはパルス線返し数を高くし、サンプリング数を増加させ、電算機によりS/Nの向上をおめることで電子的に解決できることと思われる。最後に本研究を遂行するに当たり東北大学稲塚教授、小林喬郎博士、当社電波事業部多田真弘、梅川榮吉の各氏の御協力を得た。心から感謝する次第である。

(文献) (1) A.E. Siegman: P.of IEEE, 54, 1350 (Oct. '66), (2) R.L. Schwiesow et al: Appl. Optics 15, 1 (Jan. '76), (3) K. Goto: United States Patent #3,825,341, U.K. Patent #1318475, France Patent #2141583, (4) H. Hodara: P.of IEEE, 54, 368 (March '66), (5) H. Kildal et al: P.of IEEE 59, 1644 (Dec. '71), (6) R.L. Barger & J.L. Hall: Phys. Rev. Letters, 22, 4 (1969), (7) G.R. Haines & C.E. Dahlstrom: Appl. Phys. Letters, 14, 362 (1969), (8) 後藤(顯): 応用物理, 45, 266 (March '76)